

カメラセンサネットワークにおける反応拡散モデルにもとづく 符号化レート制御機構の実装と評価

山本 宏[†] 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: †{hiroshi-y,k-hyodo,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし カメラセンサネットワークにおいては、カメラセンサノードによって撮影された映像データを限られた通信容量の無線ネットワークを通じて転送する必要があるため、全てのノードが高品質な映像データを生成するとネットワークが輻輳し、かえって映像の画質が劣化してしまう。監視、観測といったアプリケーションの観点からは、全てのノードからの映像が等しく重要というわけではないことから、我々の研究グループでは対象物の位置や速度にあわせて、ノードが自律分散的に符号化レートを制御する手法として、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ている。本稿では、実環境における提案手法の有効性を検証するため、市販のカメラとパソコンによって構成したセンサノードに提案手法を実装し、実験評価を行った。その結果、実環境においても符号化レートを適切に割り当て、パケット棄却率を抑えることが可能であるとわかった。また、輻輳を避けるため常に低画質に符号化する場合、常に高画質に符号化する場合のいずれの場合と比較しても、再生映像品質を向上できることがわかった。

キーワード カメラセンサネットワーク、符号化レート制御、反応拡散モデル、実証実験

Implementation and Evaluation of A Reaction-Diffusion based Coding Rate Control Mechanism for Camera Sensor Networks

Hiroshi YAMAMOTO[†], 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: †{hiroshi-y,k-hyodo,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Due to the limitation of wireless communication capacity, a camera sensor network will be easily congested and the perceived video quality considerably deteriorates, when all nodes generate and transmit high-quality video data. To tackle this problem, taking into account that not all video data are equally important from a viewpoint of surveillance or observation applications, our research group proposes an autonomous control mechanism, where each node appropriately determines its video coding rate according to the location and velocity of targets without any centralized control. In this paper, we implemented the mechanism and conducted practical experiments. We verified that the video coding rate was appropriately adjusted and the loss of packets was suppressed. Consequently, the perceived video quality was higher than the cases where the lowest coding rate was always used to avoid congestion and the highest coding rate was always used intending the high quality video.

Key words Camera Sensor Network, Coding Rate Control, Reaction-Diffusion Model, Experiment

1. はじめに

無線通信機能を持つセンサノードを多数配置し、環境、モノ、空間などに関する情報を収集するセンサネットワーク技術は、環境モニタリング、農業、土木、工業、職住環境制御、防犯、防

災など多くの分野で応用が期待されている [1]。ノードが具備するセンサは温度、湿度、加速度、人感など、用途によって様々ではあるが、中でもカメラを備えたノードを利用するカメラセンサネットワークは、遠隔地の監視、観測を行う上で有用な技術の 1 つとして注目を集めている [2]。例えば、街路にカメラ

センサを設置することにより、交通状態のモニタリングや、登下校時の児童の見守り、不審な事物の検知、追跡などが可能である。

温度や湿度などのセンサデータと比較して、カメラが生成する映像データは非常に大きく、特に、常に監視、観測領域をカメラで撮影し、映像を伝送する場合には、定常的に大きなトラヒックが発生する。センサネットワークの通信容量は、センサネットワークの標準規格の1つである ZigBee [3] で 250 Kbps (2.4 GHz 帯)、IEEE 802.11b で 11 Mbps というように、有線ネットワークと比較して制約が大きいため、すべてのカメラが映像を高画質に撮影し、転送すると、ネットワークが輻輳し、映像の再生品質が大きく劣化する。例えば、マルチホップネットワークでは、ノード数 n に対してノードあたりのスループットが $O(\frac{1}{\sqrt{n}})$ となることが知られており [4]、IEEE 802.11b を利用して数 Mbps の映像を送信する場合には、たかだか十台程度のノードしか接続できない。無線ネットワークにおける映像通信の品質制御については、帯域割当や再送制御 [5]、FEC (Forward Error Correction) [6] による誤り訂正などさまざまな検討がなされているが、それらの多くは軽～中負荷程度の領域を対象にしており、そもそも無線ネットワークの通信容量に対して入力トラヒックが大きすぎる場合には、これらの技術を用いたとしても輻輳を回避することはできない。

そのため、大規模なカメラセンサネットワークにおいては、これらの通信制御技術とあわせて、アプリケーションレベルで送出されるトラヒックを小さくする制御が必要となる。一般に監視、観測を行う場合には、すべてのカメラからの映像がアプリケーションにとって同等に重要であるわけではなく、対象物を撮影しているカメラやその周辺に位置するカメラからの映像が高品質に得られればよく、対象物から離れた場所を撮影しているカメラからの映像のように重要度の低いものは低品質であっても構わない。したがって、アプリケーションにとっての映像の重要度、すなわち対象物の位置や動きに応じて符号化レートを調整し、カメラセンサネットワーク全体でやりとりされるデータ量を抑えることが効果的であると考えられる。しかしながら、我々の知る限り、このようなアプリケーションレベルでの制御に関する研究はあまり多く行われていない [7] [8]。

すべてのノードの位置や状態、対象物の位置や速度などの情報を得ることができれば、最適な制御が可能であるが、時々刻々と変化する情報を収集、管理するには大量の制御情報をやりとりしなければならず、無線通信容量の制限、また、センサネットワークの長期運用の観点から、このような集中制御は困難である。したがって、それぞれのノードが隣接ノードとのやりとりを通して得た局所的な情報のみにもとづいて動作を決定する自律分散的な制御を行うことが求められる。

カメラセンサノードによる自律分散的な符号化レート制御を実現する方法の1つとして、我々の研究グループでは、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ている [9]。反応拡散モデルは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 [10]。反応拡散モデルでは、隣接する細胞間での形成因子の反応、拡散によって、因子濃度が変化し、様々

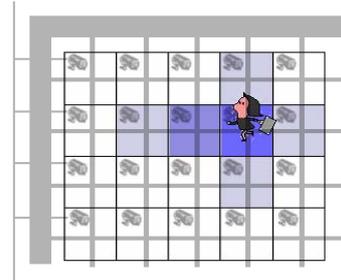


図1 カメラセンサネットワーク

なパターンが形成される。提案手法では、カメラセンサネットワークにおける符号化レートの分布と反応拡散モデルで自己組織的に形成されるパターンの類似性に着目し、隣接ノード間の因子濃度、刺激情報の交換によって形成されるパターンにもとづいて符号化レートを設定する。提案手法によって、映像トラヒックの総和が無線通信容量を越えないよう、対象物の位置や速度に応じて、符号化レートが適切に設定されることがシミュレーションによって示されているが、パケット棄却や遅延のある実環境での動作や受信映像の品質などの評価は行われていない。そこで、本稿では市販のカメラとパソコンにより構成したセンサノードに提案手法を実装し、実験評価を行うことによって、パケット棄却の発生する実環境における提案手法の有効性を検証する。

以降、2章において、反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構について説明し、3章でこの制御機構の実装について述べる。4章では実験結果にもとづき有効性について考察する。最後に、5章で本稿のまとめ、および今後の課題を述べる。

2. 反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構

本章では、反応拡散モデルにもとづくノードの自律分散的な制御によって、対象物の位置や速度に応じてネットワーク全体として符号化レートが設定される、自己組織型符号化レート制御の概要を述べる。提案手法の詳細は [9] を参照されたい。

2.1 基本動作

提案手法では、例えば図1に示すように、格子状の道路の交差点ごとに設置されたカメラセンサノードによって監視、観測を行うカメラセンサネットワークを対象としており、ノードは上下左右に隣接する4ノードとのみ通信可能である。それぞれの矩形はカメラの撮影範囲を示し、色が濃いほど符号化レートが高いことを示している。

ノードは一定間隔の制御タイミングごとに制御を行う。 t 番目の制御タイミングにおいて、隣接ノードから受信した制御情報をもとに反応拡散方程式を計算し、活性因子濃度と抑制因子濃度を決定する。制御情報には因子濃度情報と後述する刺激情報が含まれる。提案手法では、以下の反応拡散方程式を用いる。

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

speed (km/h)	A	maximum of E	minimum 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
$6 < V$	0.4	360	260

表 1 対象物の移動速度に対する刺激量と減衰係数の設定

また、関数 F , G としては以下の式を用いる。

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

ここで、 a, e は活性化の、 b, h は抑制の速度を表すパラメータである。また、 c, f は単位時間あたりの因子の減少量を、 d, g は因子の自己分解速度を表している。 M, N は因子の過剰生成による状態発散を防ぐための上限値であり、 E は刺激量を表す。刺激は撮影範囲に対象物のあるノードが、自身を中心としたスポットパターンが形成されるように設定する、活性因子濃度の増分である。

ノードの配置、制御情報の交換はともに離散的であるため、式 (1), (2) を以下のように離散化する。

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

$$\begin{aligned} F(u_{t-1}, v_{t-1}) &= \max \{0, \min \{au_{t-1} - bv_{t-1} - c, M\}\} \\ &\quad - du_{t-1} \\ G(u_{t-1}, v_{t-1}) &= \max \{0, \min \{eu_{t-1} - hv_{t-1} - f, N\}\} \\ &\quad - gv_{t-1} \end{aligned} \quad (4)$$

式 (3) 中の $u_{t-1}^u, u_{t-1}^d, u_{t-1}^l, u_{t-1}^r$, および $v_{t-1}^u, v_{t-1}^d, v_{t-1}^l, v_{t-1}^r$ は、それぞれ、上下左右に隣接するノードの活性因子濃度および抑制因子濃度を表している。これらの因子濃度は $t-1$ 番目の制御インターバル中に受信した制御情報から得られた値を用いる。なお、 $t-1$ 番目の制御タイミングから t 番目の制御タイミングまでの間のことを $t-1$ 番目の制御インターバルと呼ぶ。隣接ノードから制御情報を受信できなかった場合は、それ以前に受信した制御情報のうち最新のものを用いる。 $\Delta t, \Delta h$ はそれぞれ、格子間距離、時間の離散ステップを表す。 $E(t-1)$ は t 番目の制御タイミングでの刺激量を表し、 $t-1$ 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、および自身の刺激情報にもとづいて設定される。

2.2 刺激の設定

$t-1$ 番目の制御インターバルにおいて、撮影範囲に対象物を検出したノードは、その対象物の移動の速度や方向にもとづ

u/\sqrt{v}	coding rate
$0 < u/\sqrt{v} \leq 5000$	0.75 Mbps
$5000 < u/\sqrt{v} \leq 10000$	1 Mbps
$10000 < u/\sqrt{v}$	2 Mbps

表 2 因子濃度に対する符号化レートの設定

いて、生成されるトラヒックの総和が、局所的な無線通信容量を越えないようにしつつ、自身を中心とするスポットパターンが生成されるように刺激 E , 減衰係数 A を設定する。例えば、移動速度の速い対象物には、より広いパターンを形成するために A の値を大きく設定すると同時に、 E の値を小さく設定することによって、トラヒック量の増加を抑える。これらの値は対象物の移動方向の情報とともに、刺激情報として因子濃度情報とともにブロードキャストされる。刺激情報を受信したノードは、自身が刺激の拡散方向に位置している場合は、自ノードにおける刺激量 $E' = E \times A$ を計算し、そうでない場合は、この刺激情報を無視する。ノードは制御タイミングにおいて、隣接ノードから受信した刺激情報、自身が対象物を検出している場合には、自身が設定した刺激量のうち、最大のもを $E(t-1)$ として設定する。そして、反応拡散方程式を計算し、 u/\sqrt{v} の値にもとづいて、符号化レートを設定する。最後に刺激情報を更新し、ブロードキャストする。

2.3 刺激の調整

複数の対象物が近接した場合、形成されるパターンが衝突し、トラヒックの総和が局所的な通信容量を越えてしまう。そこで、提案手法では、パターンが衝突する領域では抑制因子濃度のピークが現れるという現象に着目し、刺激量の制御を行っている。抑制因子濃度のピークを検出したノードは、制御情報にフラグ NIP (Notification of Inhibitor Peak) を設定する。NIP は u/\sqrt{v} の勾配に沿って、対象物を検出しているノードに伝えられ、刺激量 E を $E \times \alpha$ ($0 < \alpha < 1$) と減少させる。一方、対象物が離れた場合には刺激量を回復させる必要があるため、対象物を検知しているノードは NIP を受信しなければ $E + \Delta e$ と増加させる。ただし、パターンを形成でき、かつ、パターンの過剰な広がりを抑えるため、刺激量には上限値と下限値が設定されている。

3. 反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構の実装

実環境における提案手法の有効性を検証するため、提案手法を実装し、評価実験を行った。本章では提案手法の実装について述べる。

3.1 符号化レート制御

カメラセンサノードとして、IEEE 1394 により接続されたカメラと IEEE 802.11g 規格の無線インターフェースを備えた PC を使用し、実装を行った。図 2 は、ノードにおける処理の流れを示したものである。ノードでは、自身と隣接ノードの因子濃度および刺激情報を保持している。

ノードは、常時、撮影領域内の対象物の有無について調べて

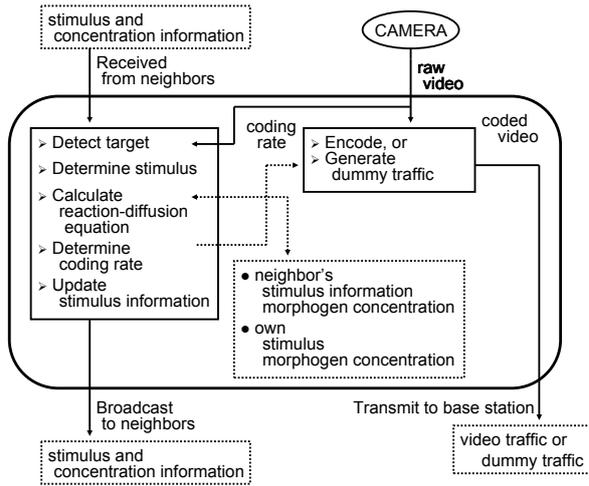


図2 ノードにおける処理の流れ

おり、一定間隔ごとに、対象物を検出している場合は、対象物の速度にもとづいて、表1に示されるように刺激量 E ，減衰係数 A を定める。ただし、刺激量はその速度での最大値を初期値とする。なお、表1は通信容量5 Mbpsのカメラセンサネットワークに4台のノードが接続する実験環境を想定しており、通信容量やノード台数によって値は異なる。次に、自身と隣接ノードの因子濃度および刺激情報をもとに、反応拡散方程式を計算し、 u/\sqrt{v} の値から表2にもとづいて符号化レートを決定する。最後に、因子濃度、刺激情報、NIPを含む制御情報をUDP/IPを用いてブロードキャストする。このパケットのペイロード長はログ情報も含めて1649 byteである。

ノードでは、導出された符号化レートをを用いて、カメラから得られる画像フレーム(YUV422形式)を任意のタイミングで符号化レートを変更できるようにしたソフトウェアエンコーダmpeg2vidcodec_v12[11]によってMPEG-2の映像データに符号化する。生成された映像データはUDP/IPを用いて、基地局に対してユニキャスト送信される。この映像データパケットのペイロード長は1092 byteである。

3.2 対象物の検出

市販されているカメラには動体を検出する機能を備えるものもあるが、我々の実験では以下に述べる方法によって対象物の検出を行った。

ノードは、現在のフレームと直前のフレームとの輝度差を求めることによって動体、すなわち対象物の有無を検出する。輝度差は直前のフレームの (i, j) ピクセルにおける輝度 $F(i, j)$ から現在のフレームの (i, j) ピクセルにおける輝度 $f(i, j)$ の差をとることによって求められる。輝度差の絶対値が閾値 x を越えるピクセル数が、閾値 y 以上であれば、フレーム内に動体があると判断し、対象物を検出したとしている。また、対象物の移動方向は、直前の数フレームに対して、輝度差が変化したピクセルの平均座標を求め、これらと比較することによって推定している。移動速度を推定するためには、対象物の大きさや対象物までの距離を求めるなど、高度な画像処理が必要であるため、我々の実験では、移動速度の推定は行わず、対象物の移動速度として

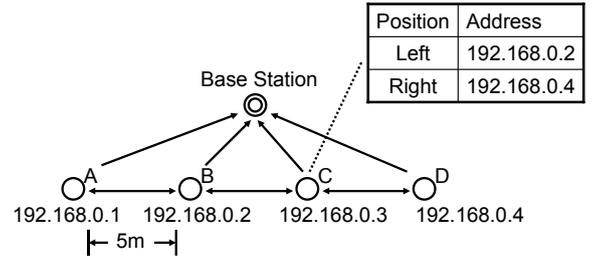


図3 実験におけるノード配置

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	1.0

表3 反応拡散方程式のパラメータ設定

は固定値を用いた。

4. 評価実験と考察

本章では、評価実験の結果を示し、提案手法の有効性について考察する。

4.1 実験環境

本実験では、図3に示すように、4台のカメラセンサノードを、5m間隔で直線状に設置し、基地局をノードB,C間の離れた場所に設置した。ノードはIEEE 802.11 IBSS (Independent Basic Service Set) により接続され、すべてのノードは、同一のネットワークアドレスを割り当てることにより、同一のIPサブネットに属している。また、どのノードも、他のすべてのノードと通信可能であるが、基地局および隣接ノードとのみ通信を行うように、個別に設定したアドレステーブルを用いて通信制御を行っている。制御間隔は0.25秒に設定し、それぞれのノードは非同期に動作している。制御情報のやりとりのために、ノードあたり53 Kbpsの帯域を利用している。反応拡散方程式のパラメータ設定は表3の通りである。

4.2 評価尺度

有効性評価の尺度として、パケット棄却率と送信映像および受信映像の原画像に対するPSNR (Peak Signal to Noise Ratio) を用いた。パケット棄却率は、ノードから送信された映像パケット数に対する、基地局で受信できなかった映像パケット数の割合を表す。また、PSNRは以下の式により求められる。

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (5)$$

MSE (Mean Square Error) は、 $m \times n$ ピクセルの画像に対して、 $F(i, j)$ を原画像の (i, j) ピクセルにおける輝度、 $f(i, j)$ を比較画像の (i, j) ピクセルにおける輝度として以下の式で計算される。

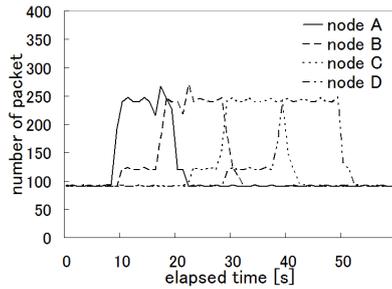


図4 ノードごとの送信パケット数の変化(提案手法)

$$MSE = \frac{\sum (f(i, j) - F(i, j))^2}{mn} \quad (6)$$

4.3 実験結果と考察

実装システムの基礎評価として、いくつかの実験を行ったところ、対象物の検出、反応拡散方程式の計算および映像データの符号化をリアルタイムで行うためには、映像の解像度とフレームレートをそれぞれ、 320×240 ピクセル、8 fps 以下にしなければならないことがわかった。この場合、生成される映像データはただか 1 Mbps であるため、ノード数が 4 台のネットワークでは輻輳が発生しない。そのため、以降では、 720×480 ピクセル、30 fps の映像データと同量のダミートラヒックを用いて行った実験の結果を示す。画質評価には、基地局で記録した受信パケットと、ノードでの符号化レートの情報をもとに作成した評価画像を用いた。

提案手法における、ノードあたりの送信パケット数の変化を図 4 に示す。本実験では、対象物は左(ノード A)から右(ノード D)に向かって、約 1.8 km/h で移動した。対象物はそれぞれのノードの撮影領域を約 10 秒かけて通過する。図 4 から、対象物の移動方向に位置するノードが、まず対象物の接近にもなって符号化レートを 0.75 Mbps から 1 Mbps へ引き上げ、対象物が撮影範囲に入ると 2 Mbps に設定し、約 10 秒後に対象物が撮影範囲から出ると元の 0.75 Mbps へ戻していることがわかる。

提案手法を適用した場合、輻輳を避けるため常に低品質に 0.75 Mbps で符号化した場合(以降では低品質符号化と表記する)、常に高品質に 2 Mbps で符号化した場合(高品質符号化)の 3 つについて、基地局に近く、他のノードからのトラヒックの影響を受けやすいノード C における送信パケット数と基地局における受信パケット数の変化を図 5 に示す。提案手法でのパケット棄却率は 0.01%、低品質符号化ではパケット棄却が発生しなかったのに対し、高品質符号化では輻輳により多くのパケットが失われ、パケット棄却率が 36.7% であった。

全ノードについての送受信パケット数の変化を図 6 に示す。図 6(a), (b), (c) におけるパケット棄却率はそれぞれ、0.24%、0.02%、42.5% であり、提案手法における、ノードあたりの平均送出トラヒックは 1.03 Mbps であった。また、対象物を撮影しているカメラにおけるパケット棄却率はそれぞれ、0.03%、0%、38.8% であった。図 6(c) 中の受信パケット数がこのネット

ワークの通信容量をおおよそ表しており、平均して 4.65 Mbps であった。これは、ネットワーク中の 1 台のノードが 2 Mbps を、他の 1 台が 1 Mbps を、その他の 2 台が 0.75 Mbps を用いた場合の総トラヒック量とほぼ等しい。パケット棄却がほとんど発生していないことから、提案手法では、自律分散的な制御によって、カメラごとの適切な符号化レートの割り当てが行われていることがわかる。

最後に、カメラで撮影された原画像に対する、ノード C における送信映像、基地局におけるノード C からの受信映像それぞれの PSNR の変化を図 7 に示す。なお、高品質符号化ではパケット棄却により受信映像の復号が不可能であった。提案手法では、対象物の動きに応じた符号化レートを制御によって、約 31 秒の時点で PSNR が 40.0 dB まで向上している。なお、映像のヘッダ情報を含むパケットが棄却されたことにより、約 29 秒で PSNR が一時的に下がっているが、これは FEC やパケットの優先権付制御によって解決可能である。一方、低品質符号化における受信映像品質は約 36.7 dB であり、特に、対象物を撮影している間は、原画像の複雑さなどのために PSNR が 35.5 dB に若干低下している。

以上の実験結果より、提案手法によって、対象物の位置や速度に応じた符号化レート制御が自律分散的に行われ、ネットワークの輻輳が回避されるとともに、アプリケーションの要求を満足する映像伝送が可能であることが示された。

5. おわりに

本稿では、反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構を実装し、評価実験を行うことによって、実環境における提案手法の有効性を検証した。その結果、ネットワークの輻輳が抑えられ、対象物の位置や速度に応じた映像が伝送、再生されることを示した。

今後は、数十台のノードからなるマルチホップネットワークにおいて、複数の対象物のリアルタイム検出、符号化レート制御、符号化、伝送を行う、より現実的な実験を行う予定である。大規模なネットワークにおいてマルチホップで伝送を行う場合には、ネットワークレベルの経路制御や輻輳制御の影響が大きくなる。大規模実験では、我々の提案する反応拡散モデルにもとづく輻輳制御手法 [12] を適用し、階層的な自律分散制御の効果についても検証する。また、本稿では、刺激や減衰係数、因子濃度と符号化レートの関係をあらかじめ設定したが、通信状態の観測による動的な設定手法についても検討したい。

謝 辞

この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いる。

文 献

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci: "Wireless sensor networks: a survey", *Computer Networks*, **38**, 4, pp. 393-422 (2002).
- [2] I. F. Akyildiz, T. Melodia and K. R. Chowdhury: "A survey on wireless multimedia sensor networks", *Computer Ner-*

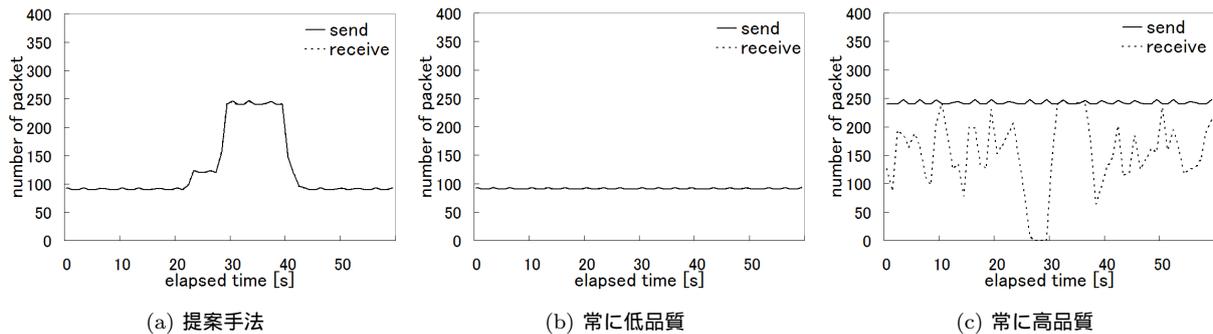


図 5 送受信パケット数の変化 (ノード C)

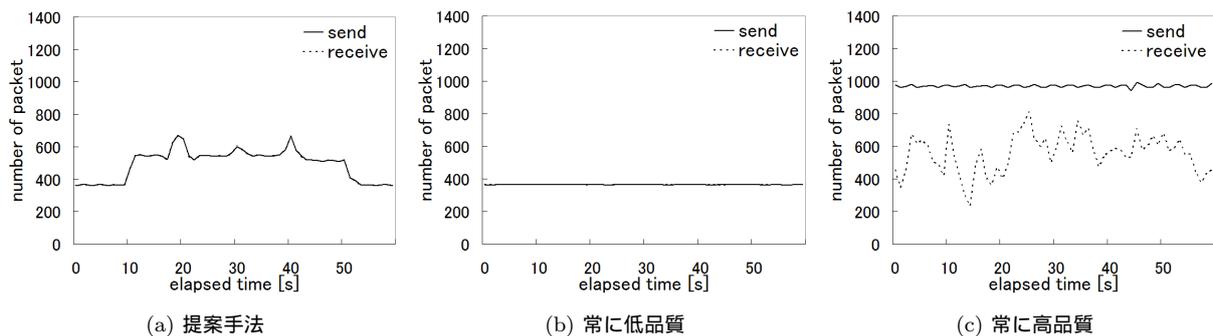


図 6 ネットワーク全体における送受信パケット数の変化

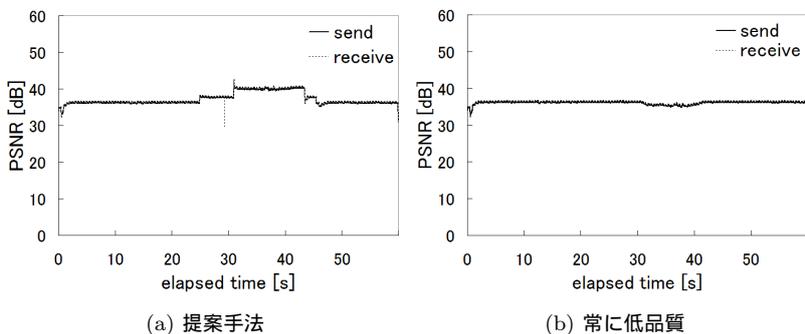


図 7 PSNR の変化 (ノード C)

works, **51**, 4, pp. 921–960 (2007).

[3] Z. Alliance: “ZigBee specification” (2005). ZigBee Document 053474r06, Version 1.0.

[4] J. Li, C. Blake, D. S. D. Couto, H. I. Lee and R. Morris: “Capacity of ad hoc wireless networks”, Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom ’01), Rome, Italy, pp. 61–69 (2001).

[5] A. Ganz, Z. Ganz and K. Wongthavarawat: “Multimedia Wireless Networks: Technologies, Standards and QoS”, Springer (2003).

[6] M. Watson, M. Luby and L. Vicisano: “Forward error correction (FEC) building block”, Network Working Group RFC 5052 (2007).

[7] Ozturk, T. Hayashi, T. Yamasaki and K. Aizawa: “Content-aware control for video transmission of wireless multi-camera surveillance system”, Proceedings of ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras (ICDSC2007), Ph.D. Forum, Vienna, Austria, pp. 394–395 (2007).

[8] X. Zhu, E. Setton and B. Girod: “Rate allocation for multi-camera surveillance over an ad hoc wireless network”, Proceedings of Picture Coding Symposium (PCS-04), San Francisco, California, USA (2004).

[9] K. Hyodo, N. Wakamiya and M. Murata: “Reaction-diffusion based autonomous control of camera sensor networks”, Proceedings of 2nd International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems (BIONETICS 2007) (2007).

[10] A. M. Turing: “The chemical basis of morphogenesis”, Royal Society of London Philosophical Transactions Series B, **237**, pp. 37–72 (1952).

[11] MPEG: “MPEG.ORG”, <http://www.mpeg.org/>.

[12] A. Yoshida, T. Yamaguchi, N. Wakamiya and M. Murata: “Proposal of reaction-diffusion based congestion control method for wireless mesh networks”, Proceedings of 10th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2008), pp. 455–460 (2008).