

# 特別研究報告

題目

カメラセンサー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

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

山本 宏

平成 20 年 2 月 19 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

カメラセンサー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

内容梗概

近年，多くの分野で無線センサーネットワークの応用に期待が持たれており，中でもカメラを備えたノードからなるカメラセンサーネットワークは，遠隔地などの監視，観測を行う上で有用な技術の 1 つとして，注目されている．

カメラセンサーネットワークにおいては，定常的に生成される映像データを，通信容量の限られた無線ネットワークを通じて転送する必要があるため，すべ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，必ずしもすべてのノードから高品質な映像を得る必要はないことから，対象物を撮影範囲に含むノードからの映像は高品質に，その周辺のノードからの映像は中程度，また，その他のノードからの映像は低画質に設定することにより，映像データの量を抑え，輻輳を回避することが有効であると考えられる．

一方，センサーネットワークでは，帯域や電力の制限のため，時々刻々と変化するセンサーノードの状態を大量の制御情報をやりとりして収集，管理するのは困難であることから，集中型制御ではなく，それぞれのノードが局所的な情報にもとづいて自らの動作を決定する自律分散型，自己組織型の制御が望ましい．そこで，我々の研究グループでは，カメラセンサーネットワークにおいて，無線通信容量の制限を考慮しつつ，対象物の位置や動きに応じて，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制御機構を提案している．

提案手法では，対象物の位置や動きに応じて，カメラセンサーネットワーク上に対象物を中心としたスポットパターンを生成し，そのパターンにもとづいて映像の符号化レートを決定する．提案手法の有効性は，シミュレーション評価によって示されているが，パケット棄却のある実環境での動作や符号化レートを制御して生成される映像の品質などについては検証されていない．本報告では，その実用性，有効性を実環境において検証するため，市販のカメラとノートパソコンによって構成したセンサーノードに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，実験評価を行った．その結果，輻輳により高品質な映像データ

が利用できない環境において、反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構を適用することで、常に低画質な映像を生成、送信する場合と比較して、パケット棄却率の増加を抑えつつ、再生映像品質を向上できることがわかった。

#### 主な用語

カメラセンサーネットワーク、反応拡散モデル、符号化レート制御、実証実験、映像品質

## 目次

1	はじめに	7
2	反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構	9
2.1	対象とするカメラセンサーネットワーク	9
2.2	反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構	9
2.2.1	反応拡散モデルによるパターン形成	10
2.2.2	自律分散的な符号化レート制御	12
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	15
3.1	実験システムの概要	15
3.2	実験システムの構成機器	17
3.2.1	カメラセンサーノード	17
3.2.2	カメラ	18
3.3	映像の符号化	18
3.4	制御情報	18
3.5	対象物の検知	19
3.6	符号化レート制御	19
4	実装システムによる評価実験	22
4.1	実験環境	22
4.2	評価尺度	22
4.3	実験結果	23
5	まとめ	35
	謝辞	36
	参考文献	37

## 目 次

1	対象とするカメラセンサーネットワーク	10
2	カメラセンサーネットワークにおける符号化レート分布	11
3	形成されるパターンの例	11
4	活性因子と抑制因子の反応	12
5	反応拡散モデルにおける因子濃度の変化	13
6	実験ネットワーク構成	16
7	ノードにおける処理の流れ	17
8	反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構の処理の流れ	21
9	実験の様子	22
10	ノード配置および対象物の移動の例	23
11	符号化レート制御を適用した場合の送信データ量と受信データ量の変化(ノード A)	25
12	符号化レート制御を適用した場合の送信データ量と受信データ量の変化(ノード B)	25
13	符号化レート制御を適用した場合の送信データ量と受信データ量の変化(ノード C)	26
14	符号化レート制御を適用した場合の送信データ量と受信データ量の変化(ノード D)	26
15	常に低画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化(ノード A)	27
16	常に低画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化(ノード B)	27
17	常に低画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化(ノード C)	28
18	常に低画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化(ノード D)	28
19	常に高画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化(ノード A)	29
20	常に高画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化(ノード B)	29
21	常に高画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化(ノード C)	30

22	常に高画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化（ノード D）	30
23	符号化レート制御を適用した場合の PSNR の変化（ノード A）	31
24	符号化レート制御を適用した場合の PSNR の変化（ノード B）	31
25	符号化レート制御を適用した場合の PSNR の変化（ノード C）	32
26	符号化レート制御を適用した場合の PSNR の変化（ノード D）	32
27	常に低画質で符号化した場合の PSNR の変化（ノード A）	33
28	常に低画質で符号化した場合の PSNR の変化（ノード B）	33
29	常に低画質で符号化した場合の PSNR の変化（ノード C）	34
30	常に低画質で符号化した場合の PSNR の変化（ノード D）	34

## 表目次

1	動体の移動速度に対する刺激量を減衰係数の設定 . . . . .	15
2	実験に用いたノートパソコンの仕様 . . . . .	17
3	パラメータ設定 . . . . .	20
4	因子濃度と符号化レートの対応 . . . . .	20

## 1 はじめに

無線通信機能を持つセンサー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ー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の応用が期待されている [1]。ノードの具備するセンサーは温度、湿度、加速度、人感など、用途によって様々であるが、中でもカメラを備えたノードを利用したカメラセンサーネットワークは、遠隔地などの監視、観測を行う上で有用な技術の 1 つとして注目されている [2]。例えば、街路にカメラセンサーを設置することにより、交通状態の遠隔モニタリングや、登下校時の児童の見守り、不審な事物の検知、追跡などが可能となることから、安全・安心な社会を実現するための技術として活発な研究開発が行われている。

温度や湿度などのセンサーデータと比較して、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。センサーネットワークの通信容量は、センサーネットワークの標準規格の一つである ZigBee [3] で 250 Kbps (2.4 GHz 帯)、無線 LAN で使用される IEEE 802.11b の場合には 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、パケットをノード間中継で転送する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 の高品質な映像データを送信する場合には十台程度のノードしか接続できないことになる。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～中負荷程度の領域で通信制御を行うものであり、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ー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、送出されるトラヒック自体を小さくする制御が必要となる。一方、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画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、カメラセンサー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。

センサーネットワークを利用して広い範囲の詳細な情報を収集するためには、領域内に多



数のノードを配置し，所望の機能を達成できるよう，これらを適切に制御する必要がある．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，管理するためには大量の制御情報をやりとりしなければならず，このような無線通信容量の制限，また，センサーネットワークの長期運用の観点から，集中制御は困難である．したがって，センサーネットワークにおいては，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．

カメラセンサーノードの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自律分散的なカメラセンサーネットワーク制御機構を提案している [7]．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．反応拡散モデルでは，隣接する細胞間での形成因子のやりとりによって，因子濃度の分布が変化し，さまざまなパターンが形成される．提案手法では，カメラセンサー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，符号化レート制御に反応拡散モデルのパターン生成メカニズムを応用している．平面上に構成されたカメラセンサーネットワークにおいて，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ことにより，見守り，監視対象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，その周囲と移動方向のカメラの符号化レートを中程度，その他のカメラの符号化レートを低くというように，対象物の位置や速度に応じた符号化レート制御を実現する提案手法については，その有効性が計算機シミュレーションによって示されている．ここでは，隣接ノードのみとの情報交換によって適切なパターンを形成し，複数の対象が近くに検出された場合も，その周辺の局所的な映像トラヒックの総和が無線通信容量を越えないように調整できることが示されている．しかしながら，因子濃度と符号化レートの具体的な対応付け，また，生成される映像の品質変化など，実環境での動作検証や実用性の評価は行われていない．

そこで，本報告では，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，実験評価を行うことによって，この制御手法が実環境においても正しく機能し，対象の位置や移動方向にあわせて適切な符号化レートのパターンが形成できること，および，適切な画質で符号化された映像が得られることを確認し，さらに，パケット棄却や再生映像品質にもとづいて，この手法の実環境における実用性および有効性を検証する．

以降，2章において，対象とするカメラセンサーネットワークと，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章では実装したシステムを用いた評価実験の結果を示し，この制御機構の実環境における有効性，実用性を考察する．最後に，5章で本報告のまとめ，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符号化レート制御機構

本章では、対象とするカメラセンサーネットワークの概要と、本報告で実装、評価を行った反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構の詳細を述べる。本機構は、反応拡散モデルを応用することにより、対象物の位置や移動速度に応じた符号化レートのパターンをノード間の情報交換によって自己組織的に形成する。また、映像のデータ量が局所的な通信容量を越えないように、符号化レートを制御する。

### 2.1 対象とするカメラセンサーネットワーク

本報告では、図1のような格子状に道路がある街において、道路の交差点ごとにカメラセンサーノードを設置して、街中を歩いている対象を監視、もしくは見守ることを目的としたカメラセンサーネットワークを想定している。交差点に設置されたカメラセンサーノードはそれぞれ、無線ネットワークによって接続され、上下左右の隣接ノードとのみ直接通信するものとする。また、大通りには有線ネットワークが敷設されており、大通りに設置されたカメラセンサーノードは、カメラセンサーネットワークのゲートウェイノードとしてこの有線ネットワークに直接接続されているものとする。カメラセンサーネットワークを構成するカメラセンサーノードで撮影された映像は、それぞれのカメラセンサーノードから、カメラセンサーノード間のマルチホップ通信によって、大通りに設置されたカメラセンサーノードに送られ、さらに、有線ネットワークを通して監視センターへと伝えられる。ただし、この有線ネットワークの通信容量は無線ネットワークと比較して十分に大きいものとする。なお、ノードは、画像処理技術などを用いることにより、カメラで撮影した映像から監視、見守り対象を検出し、移動方向や速さなどを推定可能であるものとする。また、本報告では生成される映像データの無線通信容量超過を抑制するための符号化レート制御に焦点を当てており、ノードで生成された映像データをゲートウェイノードに伝送するための経路制御やMAC制御などについては研究の対象としない。

### 2.2 反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構

カメラセンサーネットワークにおける対象物の位置や速度に応じた符号化レート設定の例を図2に示す。図中、それぞれの矩形はカメラの撮影範囲を表し、色が濃いものほど高い符号化レートをを用いて高品質な映像を生成していることを示す。ここでは、右から2つめ、上から2つめのカメラセンサーノードの撮影範囲にある対象物が、左方向にある速さで移動している様子を示している。対象物をとらえているカメラでは最も高い符号化レートをを用いて映像データを生成しており、その周囲四方のうち、移動方向のカメラは中程度、残りのカメ

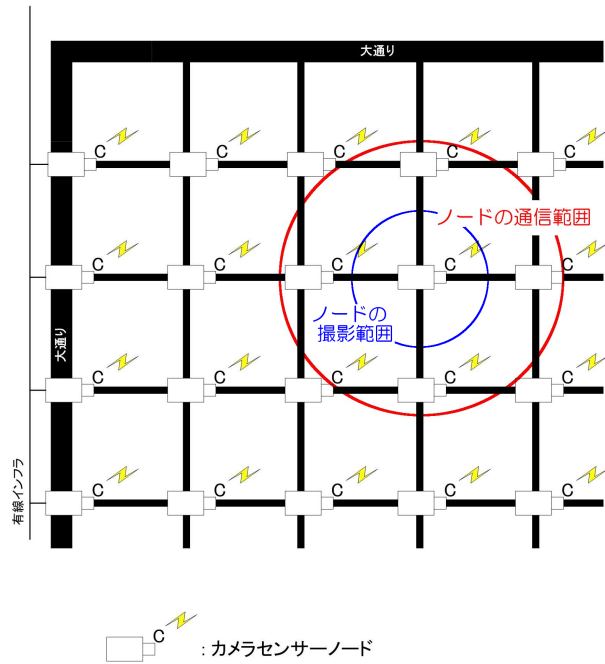


図 1: 対象とするカメラセンサーネットワーク

ラは低品質な映像データを生成している。また、対象物から左に2つ離れたノードでも低品質な映像データを生成している。その他14台のカメラセンサーノードでは最低限の符号化レートを用いている。このような符号化レート制御により、全体の映像トラフィックを抑えつつ、重要な領域については高品質な映像が得られる。

### 2.2.1 反応拡散モデルによるパターン形成

反応拡散モデルは、1952年にアラン・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 [8]。反応拡散モデルでは、隣接する細胞間で活性因子、抑制因子と呼ばれる2種類の化学物質をやりとりし、これらの化学物質の化学反応と拡散を繰り返すことによって、化学物質の不均一な濃度分布が現れる。この濃度分布は、濃い部分と薄い部分が繰り返し現れるパターンになっており、反応拡散モデルの条件によって図3に示されるような斑紋、網目、縞などさまざまなパターンを形成できることが知られている。

化学物質の反応と拡散を表す反応拡散方程式は、一般に以下のような2変数の偏微分方程式を用いて表現されている [9]。

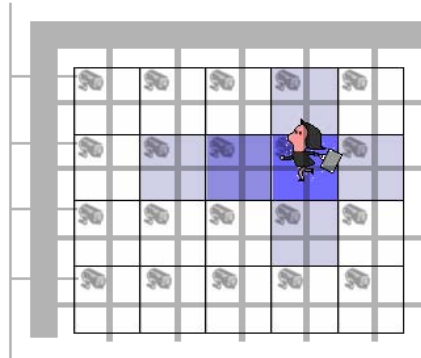
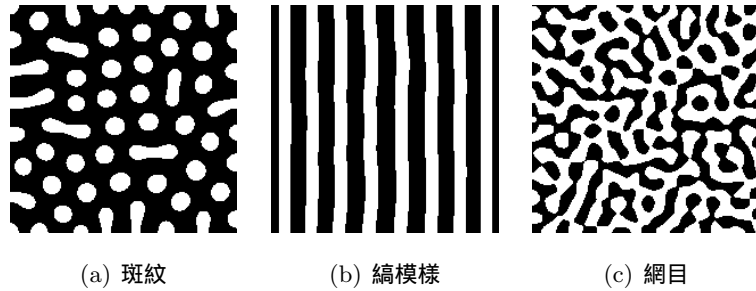


図 2: カメラセンサーネットワークにおける符号化レート分布



(a) 斑紋

(b) 縞模様

(c) 網目

図 3: 形成されるパターンの例

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

ここで、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。  $F$  と  $G$  は反応を表す関数、 $\nabla^2 u$  と  $\nabla^2 v$  は拡散を表す行列である。第 1 項は反応項と呼ばれ、第 2 項は拡散項と呼ばれる。

文献 [9] によると、反応拡散方程式によってパターンを形成するためには、それぞれの因子は以下の条件を満たす必要がある (図 4)。

- 活性因子は活性因子、抑制因子の両方を増加させる作用を持っているが、抑制因子は活性因子を減少させる作用を持っている。
- 抑制因子の拡散速度のほうが、活性因子の拡散速度よりも大きい ( $D_v/D_u > 0$ )。

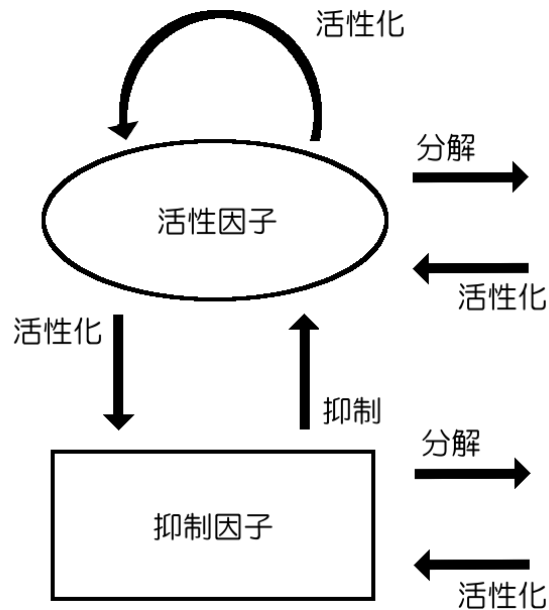


図 4: 活性因子と抑制因子の反応

濃度分布が一様な状態から何らかの摂動によってある点  $x$  における活性因子が増えた場合 (図 5(1)), 活性化によってその点  $x$  の活性因子, 抑制因子が増加する (図 5(2)). 抑制因子のほうが拡散速度が大きいため, 生成された抑制因子は活性因子に比べてより広く拡散する. 抑制因子は点  $x$  の周囲における活性因子の増加を抑制する一方で, 点  $x$  では活性因子自身が活性因子を活性化するため, 中心では活性因子濃度が相対的に大きく, 周辺では抑制因子濃度が相対的に大きくなる (図 5(3)). このようにして因子濃度のパターンが現れる.

### 2.2.2 自律分散的な符号化レート制御

文献 [7] では, 図 2 に示した符号化レートの分布パターンと, 反応拡散モデルで生成される斑紋の類似性に着目し, 自律分散的な符号化レート制御を実現している. 周囲との活性因子, 抑制因子の拡散を通して自己組織的にパターン形成を行う反応拡散モデルにもとづくことにより, 周囲のノードとの情報交換だけでノードの動作, 符号化レートを設定することができる.

提案手法におけるノードの基本動作は次の通りである. まず, ノードは, 一定間隔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. また, 自身が対象物を撮影範囲にとらえている場合には, 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, 刺激と呼ばれる活性因子濃度の増分を設定する. 次の制御タイミングまでに映像符号化に用いる符号化レート

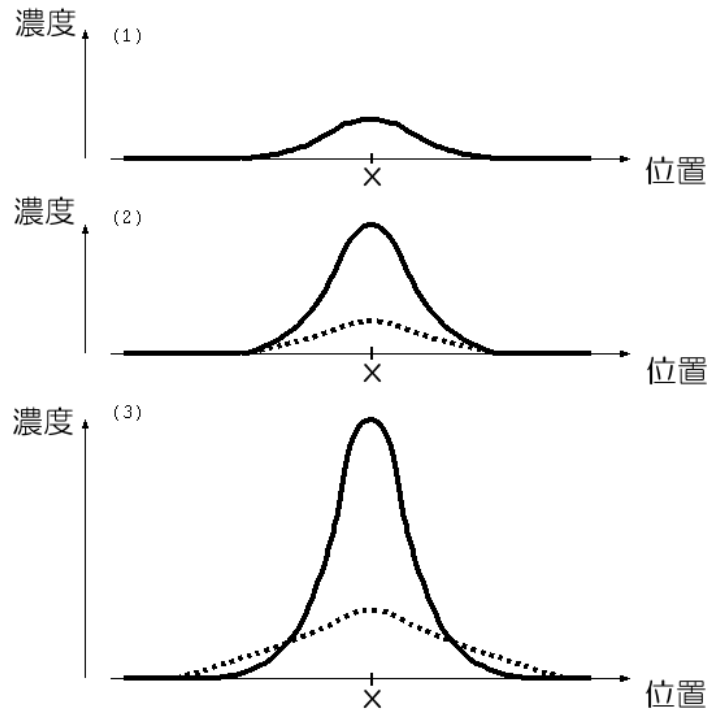


図 5: 反応拡散モデルにおける因子濃度の変化

は、活性因子濃度と抑制因子濃度にもとづいて設定される．その後、因子濃度と刺激の情報を隣接ノードにブロードキャストする．

提案手法では、以下の反応拡散方程式を用いる．

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

また、反応を表す関数は以下の式を用いる．

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

ここで、係数  $a$  は活性因子が自身を活性化する強さ、係数  $b$  は抑制因子が活性因子を抑制する強さ、係数  $e$  は活性因子が抑制因子を活性化する強さ、係数  $h$  は抑制因子が自身を抑制す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の増加量を示し、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． $M, N$  は因子の過剰生成による状態発散を防ぐための上限を表す定数である． $E(t)$  は、刺激の量を表す．

式 (2), (3) は連続系の式であるが, センサーネットワークではノードは離散的に配置され, また制御情報のやりとりも定期的に行われるため, これらの式を以下のように離散化する.

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

$$\begin{cases} F(u_{t-1}, v_{t-1}) = \max \{0, \min \{au_{t-1} - bv_{t-1} - c, M\}\} \\ G(u_{t-1}, v_{t-1}) = \max \{0, \min \{eu_{t-1} - hv_{t-1} - f, N\}\} \end{cases} \quad (5)$$

ここで,  $u_t, v_t$  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. 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.  $u_{t-1}^u, u_{t-1}^d, u_{t-1}^l, u_{t-1}^r, v_{t-1}^u, v_{t-1}^d, v_{t-1}^l, v_{t-1}^r$  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制御情報として受信する. パケット棄却などによって, 隣接ノードからの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使用する.  $\Delta t, \Delta h$  はそれぞれ, 格子間距離, 時間の離散ステップである.

$E(t-1)$  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, および自身の刺激情報にもと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) からなる. 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, 刺激情報として隣接ノードにブロードキャストする. 例えば, 文献 [7] では, 生成される映像データの総和がある一定値以下になるように, 表 1 のような対応づけを行っている. まず, 対象物を撮影範囲にとらえているカメラセンサーノードは刺激量  $E(t)$  を上限値に設定する. 例えば, 速さ 1 km/h の対象物を検出した場合には,  $E(t) = 1370$  となる. 刺激量  $E$  と減衰係数  $A$  の組み合わせによってスポットパターンの生成される範囲と, それぞれのノードにおける因子濃度が決まり, 映像トラヒックをある無線通信容量内に抑えることができる. しかしながら, 複数の対象物が近くのノードの撮影領域に存在した場合, それぞれのノードを中心として生成されるスポットパターンが衝突する場合がある. このとき, パターンがぶつかるノード周辺では因子濃度が高くなり, 結果として, 生成される映像データの総和が局所的な通信容量を超えてしまう. 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, 衝突時には刺激量を抑える制御を行う. 抑制因子濃度のピークによって衝突を検出したノードは, 対象物を撮影し, 刺激を設定しているノードに対し, NIP (Notification of Inhibitor Peak) というメッセージを送信する. これを受信すると, 対象物を撮影している

$V(\text{km/h})$	$A$	$E$ の上限	$E$ の下限
$V = 0$	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: 動体の移動速度に対する刺激量を減衰係数の設定

ノードは刺激量  $E(t)$  を  $E(t-1) \times \alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) によって減衰させる。ただし、パターンが形成されるよう、表 1 に示される下限値を下回ることはない。一方、対象物が離れた場合などに減衰した刺激量を回復させるため、NIP を受信しない場合には、制御タイミングごとに刺激量  $E(t)$  を  $E(t-1) + \Delta e$  と増加させる。ただし、パターンが広がりすぎないように、上限値を超えることはない。

刺激情報を受け取ったノードは、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  $E' = A \times E$  を求め、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、制御インターバルで受信した刺激と、自身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  $E(t-1)$  に設定し、反応拡散方程式の計算に使用する。式 (4), (5) によって導出された活性因子濃度  $u$  と抑制因子濃度  $v$  から  $u/\sqrt{v}$  を求め、これを符号化レートにマッピングする。

その後、それぞれの刺激情報内の刺激量  $E$  をそれぞれ計算した  $E'$  に更新し、ブロードキャストする。

### 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

本章では、前章で説明した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の詳細を述べる。

#### 3.1 実験システムの概要

反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構の実環境下での実用性および有効性を検証するために、直線状に等間隔に配置されたカメラセンサーノードと、映像データを受信する基地局からなるシステムを構築した (図 6)。基地局としては、カメラを接続しないパソコンを使用し、いずれのノードからも通信可能な位置に配置し、これらの機器は無線ネット



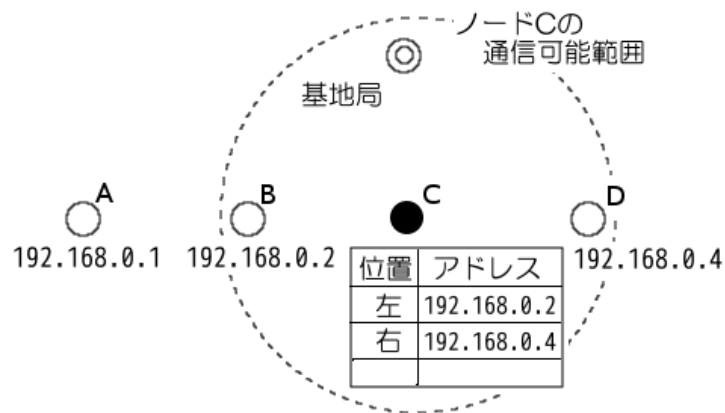


図 6: 実験ネットワーク構成

ワークのアドホックモード (IEEE 802.11 IBSS (Independent Basic Service Set)) によって互いに接続されている。カメラセンサーノード、基地局はすべて同じサブネットに属し、それぞれ異なる IP アドレスが割り当てられている (図 6)。それぞれのノードは隣接ノードと基地局とのみ通信が可能である。また隣接ノードの IP アドレスおよび物理的な位置関係は、あらかじめ分かっているものとし、図 6 に示すようにテーブルで管理している。なお、実験用の本サブネットには他のノードは存在しない。

カメラセンサーノードとしては、市販の Web カメラおよび無線 LAN インターフェースを接続した PC を使用した。カメラセンサーノードは隣接ノードと、符号化レート制御に必要な制御情報をブロードキャスト通信によってやりとりして、これらの情報をもとに反応拡散方程式を計算し、符号化レートを決定する。制御間隔は全ノードで一定であるが (実験では 0.25 秒)、他のノードとは非同期に動作し、それぞれが反応拡散方程式を計算した時点で、制御情報を送信する。また接続されたカメラによって撮影された映像を、因子濃度から決定した符号化レートをを用いて符号化し、得られた映像を映像受信用の基地局へ直接ユニキャスト通信によって送信すると同時に自身のハードディスクに保存する。図 7 はノードにおける処理の流れを示したものであり、丸は機器、四角は処理を表す。また二重の四角は次の制御インターバルで利用するために保持している前の制御インターバルでの情報を表す。

なお、使用する機器の処理能力などの制約から、映像をノードでリアルタイムに符号化、送信する場合には、解像度 320×240 ピクセル、フレームレート 8 フレーム/秒の MPEG2 符号化となるが、4 章の実験では、反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御、および、符号化される映像データと同量のダミートラヒックの生成、送出手をリアルタイムに行い、映像

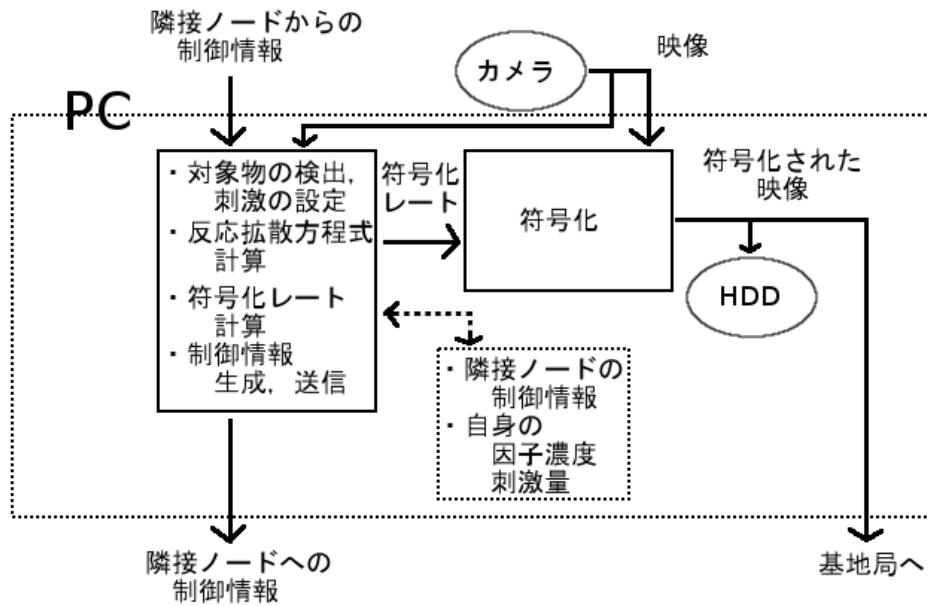


図 7: ノードにおける処理の流れ

CPU	低電圧版 Core Duo 1.66 GHz
メモリ	1.5 GB
無線インターフェース	Intel Pro Wireless 3945ABG

表 2: 実験に用いたノートパソコンの仕様

データは実験結果にもとづいて別途生成した。本実験では、解像度 720×480 ピクセル、フレームレート 30 フレーム/秒 の MPEG2 メインプロファイル、メインレベルの符号化を行った。

## 3.2 実験システムの構成機器

### 3.2.1 カメラセンサーノード

実験にはカメラセンサーノードとしてカメラを接続した 4 台のノートパソコンを利用した。ノートパソコンの主な仕様を表 2 に示す。

### 3.2.2 カメラ

カメラセンサーノードに接続するカメラとしてアップルコンピュータ製の iSight を利用した。このカメラは IEEE 1394 によってノートパソコンに接続して利用できる。また国際的工業カメラ規格である IIDC (Instrumentation and Industrial Digital Camera) に準拠しているため、libdc1394 などのライブラリを使用することによってオープンソース系の OS からも使用可能である。実装に際しては、ライブラリとして libdc1394 version 2 を利用した。

### 3.3 映像の符号化

IEEE 1394 で接続されたカメラからは YUV422 フォーマットの静止画像列が取得される。ノードは、この画像列を、直前の制御タイミングで決定された符号化レートによって順に MPEG2 映像に符号化し、UDP を用いて基地局にユニキャスト送信する。なお、4 章の実験ではリアルタイムに符号化は行わず、送信データは映像データと同サイズのダミーパケットを用いた。エンコーダとしては、MSSG (MPEG Software Simulation Group) [10] により開発されているオープンソースの mpeg2vidcodec\_v12 を利用した。なお、通常の MPEG2 符号化では、シーケンスを通して一定の符号化レートを用いるため、任意のタイミングで任意の符号化レートを指定できるように変更を加えた。

### 3.4 制御情報

ノードは制御タイミングごとに制御情報として以下の情報を UDP でブロードキャストする。なお、本システムは Java で実装を行ったため、それぞれの情報に対して利用されている Java の変数の型を示す。

- 自身が対象物を検出しているかどうか
  - boolean 型
    - \* true 検出している
    - \* false 検出していない
- 活性因子濃度
  - double 型
    - ただし、正または 0。
- 抑制因子濃度

- double 型  
ただし，正または 0 .
- 各方向への刺激量
  - double 型の 2 次元配列  
対象物ごとに 4 方向の刺激量を保持し，移動方向に該当するところのみに値を入れる .
- 各方向への減衰係数
  - double 型の 2 次元配列  
対象物ごとに 4 方向の減衰係数を保持し，移動方向に該当するところのみに値を入れる .

ノードは他のノードがブロードキャストした制御情報を受信すると，送信ノードを確認し，あらかじめ隣接ノードとして設定したもの以外であれば破棄する．隣接ノードからのものであれば，そのノードから前回受信した情報と置き換え，最新の情報として保持する．

### 3.5 対象物の検知

本実験システムでは，現在のフレームと直前のフレームとのピクセル間輝度差を求めることで動体，すなわち対象物の有無を検出している．輝度差は  $F(i, j)$  を直前のフレームの  $(i, j)$  ピクセルにおける輝度， $f(i, j)$  を現在のフレームの  $(i, j)$  ピクセルにおける輝度として以下の式で計算される．

$$\text{輝度差} = F(i, j) - f(i, j) \quad (6)$$

輝度差がある閾値  $x$  以上のピクセル数を求め，この数が閾値  $y$  以上であればフレーム内に動体が存在すると判断する．閾値を変更することで，動体認識の感度を調整できる．

また，輝度差がある閾値以上のピクセルの平均座標を，直前の数フレームと比較することによって，移動方向を推定している．ただし，対象物の移動速度については，あらかじめ設定した値を利用している．

### 3.6 符号化レート制御

ノードは制御タイミングごとに図 8 に示す一連の処理を行う．まず，直前の制御インターバルで対象物をカメラの撮影範囲内に検出したかどうかを確認する．対象物を検出した場合には，表 1 に示すように，対象物の速度から刺激と減衰係数を決定する．次に，反応拡散方

程式の計算に用いる刺激量を，それぞれの隣接ノードから受信した刺激量に減衰系数をかけたものと，自身の刺激量のうち最大の値に設定する．この刺激量と，隣接ノードから受信した因子濃度情報，および自身の因子濃度にもとづいて式 (4)，(5) を用いて自身の新しい因子濃度を導出する．さらに，活性因子濃度  $u$  と抑制因子濃度  $v$  によって定められる値  $u/\sqrt{v}$  から，表 4 にもとづいて符号化レートを決定する．次の制御タイミングまではこの符号化レートが用いられる．最後に，自身の因子濃度，刺激量，減衰系数から制御情報を構成し，UDP でブロードキャストする．

パラメータ	値	パラメータ	値
$a$	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	$\Delta t$	2.0
$g$	0.14	$\Delta h$	1.0

表 3: パラメータ設定

$u/\sqrt{v}$	符号化レート
$0 < u/\sqrt{v} \leq 5000$	1 Mbps
$5000 < u/\sqrt{v} \leq 10000$	2 Mbps
$10000 < u/\sqrt{v}$	3 Mbps

表 4: 因子濃度と符号化レートの対応

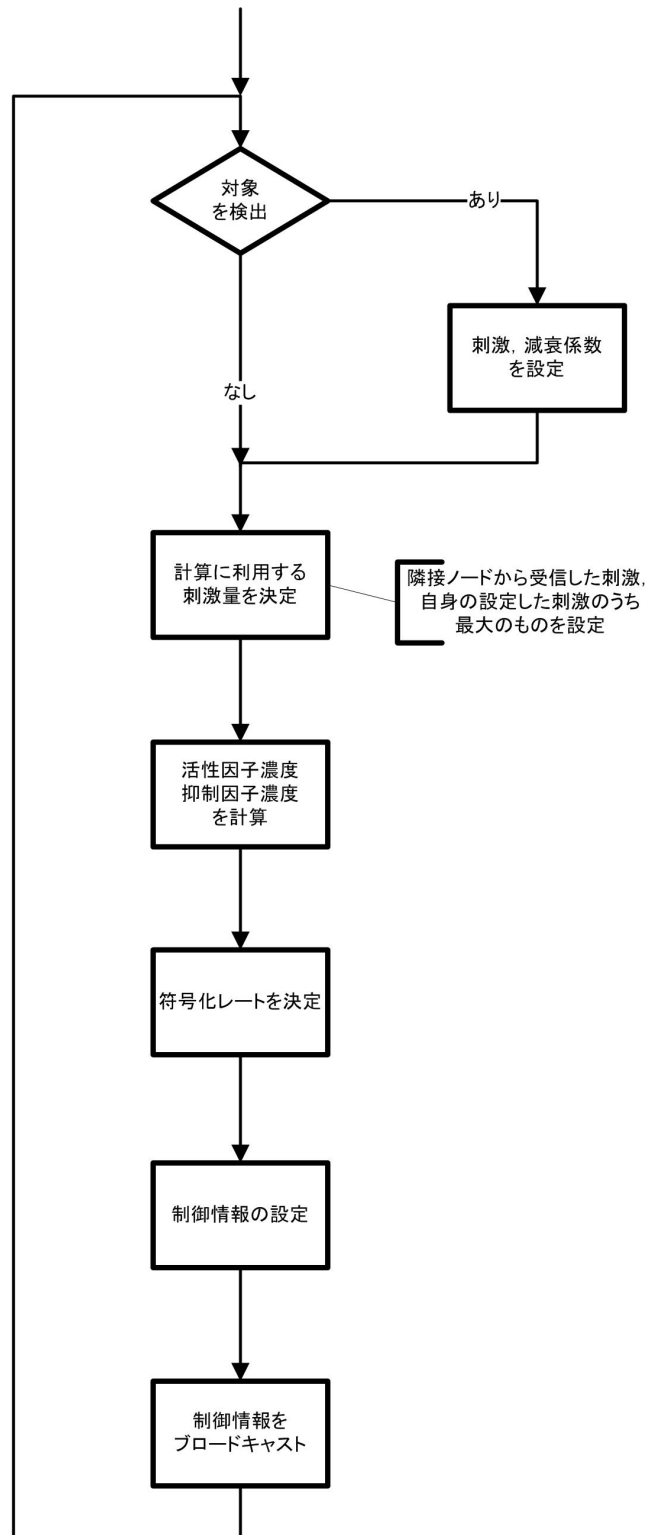


図 8: 反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構の処理の流れ

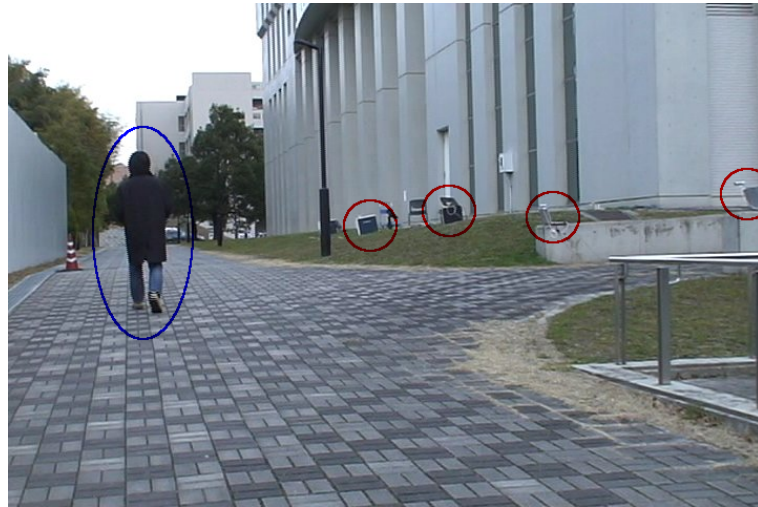


図 9: 実験の様子

## 4 実装システムによる評価実験

本章では，前章で説明した実験システムを用いて行った実験の内容と結果を述べる．

### 4.1 実験環境

本実験は，大阪大学の情報系総合研究棟とコンベンションセンターとの間の道で行った（図 9）．この道沿いに，4 台のカメラセンサーノードを 5 m 間隔の直線に配置し，基地局をこれらのノードのほぼ中央に設置した．ノードを収容する無線ネットワークのチャンネルは，周辺での利用状況を確認し，もっとも使用されていないと考えられるものを用いた．実験は 2008 年 2 月 16 日の 15 時から 17 時にかけて行った．当日の天候はくもりであった．

カメラは等しく情報系総合研究棟を向いて設置され，対象物である人が，立ち止まったり方向転換することなく，およそ 4 km/h の速さでカメラと情報系総合研究棟の間を一方方向に移動した（図 10）．赤い丸がカメラセンサーノード，青い丸が対象物を示す．

### 4.2 評価尺度

反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構の実用性をパケット棄却率，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) の値によって評価する．パケット棄却率は，それぞれのカメラセンサーノードから基地局に向けて送信したパケット

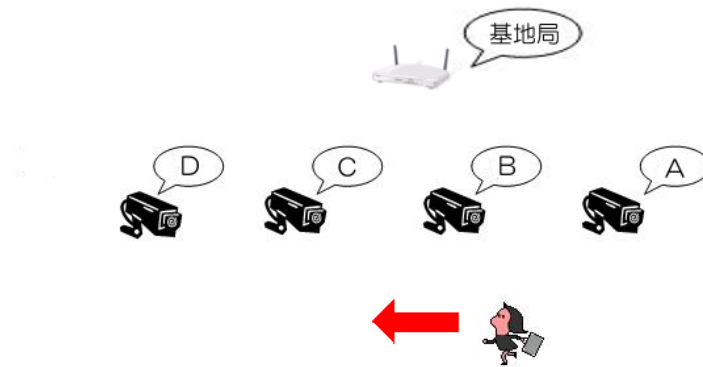


図 10: ノード配置および対象物の移動の例

のうち，基地局が受信できなかったものの割合で与える．また，PSNR は以下の式によって求められる．

$$PSNR = 20 \log_{10} \left( \frac{255}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (7)$$

式 (7) 中の MSE (Mean Square Error) は平均二乗誤差を表し，画素数  $m \times n$  ピクセルの送信画像，受信画像に対して， $F(i, j)$  を原画像の  $(i, j)$  ピクセルにおける輝度， $f(i, j)$  を比較対象画像の  $(i, j)$  ピクセルにおける輝度とすると以下の式で計算される．

$$MSE = \frac{\sum (f(i, j) - F(i, j))^2}{mn} \quad (8)$$

なお，式 (7) 中の 255 は輝度の最大値である．

#### 4.3 実験結果

符号化レート制御を適用した場合の，1 秒あたりの送信データ量と受信データ量の変化をノードごとに図 11 から図 14 に示す．また，常に 1 Mbps の低い符号化レートで符号化した場合，および 3 Mbps の高い符号化レートで符号化した場合についても同様に，それぞれ図 15 から図 18，図 19 から図 22 に示す．なお，ノードは A, B, C, D の順に設置されており，この順でカメラの撮影領域を人が通過した (図 10)．

図 11 から図 14 より，人の動きにあわせて，人を撮影範囲にとらえているカメラセンサーノード，およびその前後のカメラセンサーノードが符号化レートを適切に設定することによって映像データ量が変化していることが分かる．また，基地局に近いノード B，およびノード C が高レートで符号化した際の packets 棄却率が比較的高いことが分かる．これは，カメラセンサーネットワークを構成する 4 台のノードのうち，ノード B，およびノード C が



中央よりに位置し、人がこれらのノードの前を通過する時にカメラセンサーネットワーク全体において送出される映像データ量の総和が最大になることが原因と思われる。一方、符号化レートを 1 Mbps に固定した場合には、符号化レート制御を適用した場合と比較して、実験を通してパケットの棄却率が少ない。また、符号化レート 3 Mbps の場合には、常に多くのパケットが棄却されていることが分かる。60 秒間（1800 フレーム）の実験をとおした全ノードでの平均パケット棄却率は、1 Mbps の場合に 1.34%、3 Mbps の場合には 40.70%、符号化レート制御を適用した場合には 7.27%であった。また、対象物をとらえているカメラにおける平均パケット棄却率はそれぞれ 0%、35.06%、12.75%であった。なお、符号化レート制御を適用した場合の平均映像データ送出レートは 1.63 Mbps であった。これより、符号化レート制御により、映像トラヒックを制御し、パケット棄却率を抑えていることがわかる。

次に、符号化レート制御を適用した場合の、送信映像の PSNR、受信映像の PSNR をノードごとに図 23 から図 26 に示す。また、常に 1 Mbps の低い符号化レートで符号化した場合についても同様に図 27 から図 30 に示す。なお、常に高品質に符号化した場合（符号化レート 3 Mbps）については、パケット棄却が多すぎるため、デコードできないフレームが多く、比較できなかった。図 23 から図 26 より、対象物の検知によって符号化レートを高くした場合には、送信映像の画質が最大約 42.4dB まで向上する一方で、先に示したとおり、パケット棄却率が増加するため、受信映像の品質が劣化しやすい傾向にあることがわかる。符号化レートを 1 Mbps に固定した場合には、送信映像の画質が約 36.4dB であり、さらにパケット棄却の影響が少ないにもかかわらず、対象物をとらえている間の画質が 27.2dB まで低下する。これは、対象物の移動による激しい画像の変化に対して符号化レートが低すぎるためである。

以上より、反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構を適用することにより、対象物の移動に応じた符号化レート制御が実現されるとともに、常に低品質な映像を生成、送信する場合と比較して、パケット棄却率の増加を抑えつつ、再生映像品質を向上できることが示された。

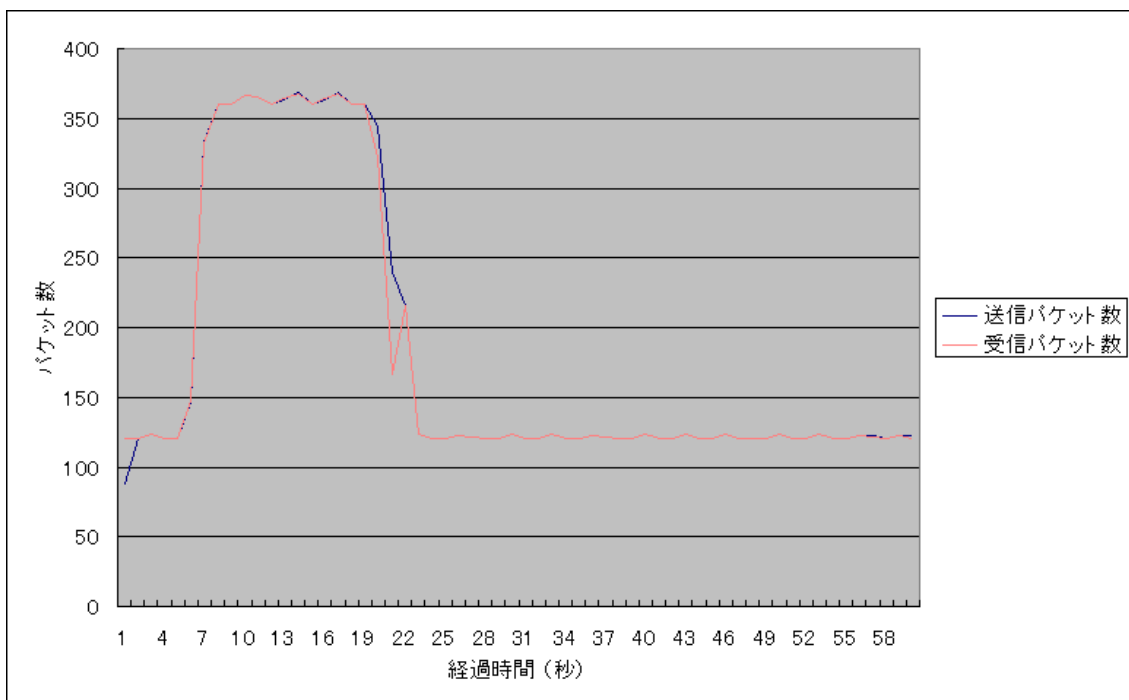


図 11: 符号化レート制御を適用した場合の送信データ量と受信データ量の変化 (ノード A)

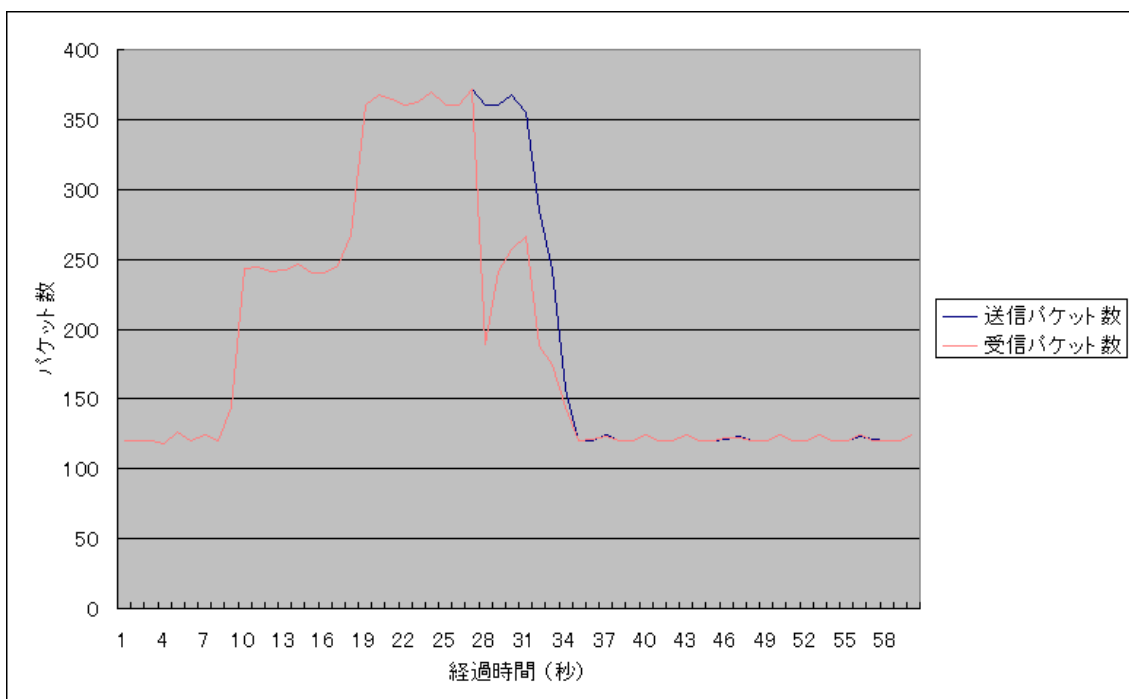


図 12: 符号化レート制御を適用した場合の送信データ量と受信データ量の変化 (ノード B)

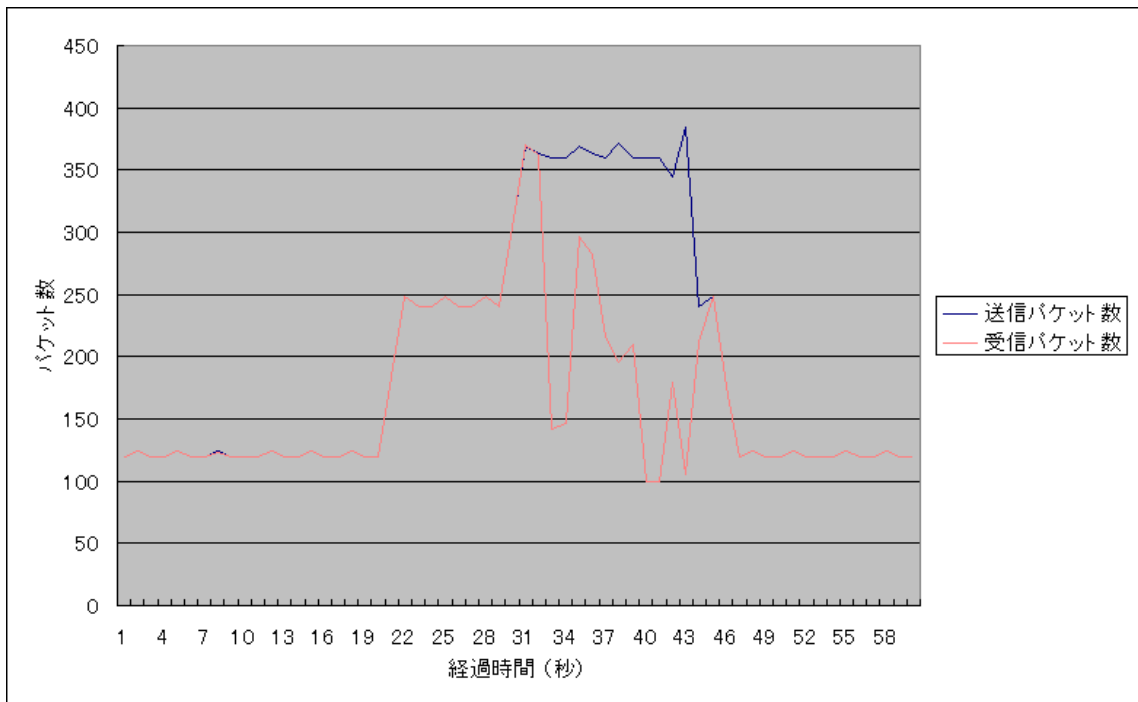


図 13: 符号化レート制御を適用した場合の送信データ量と受信データ量の変化 (ノード C)

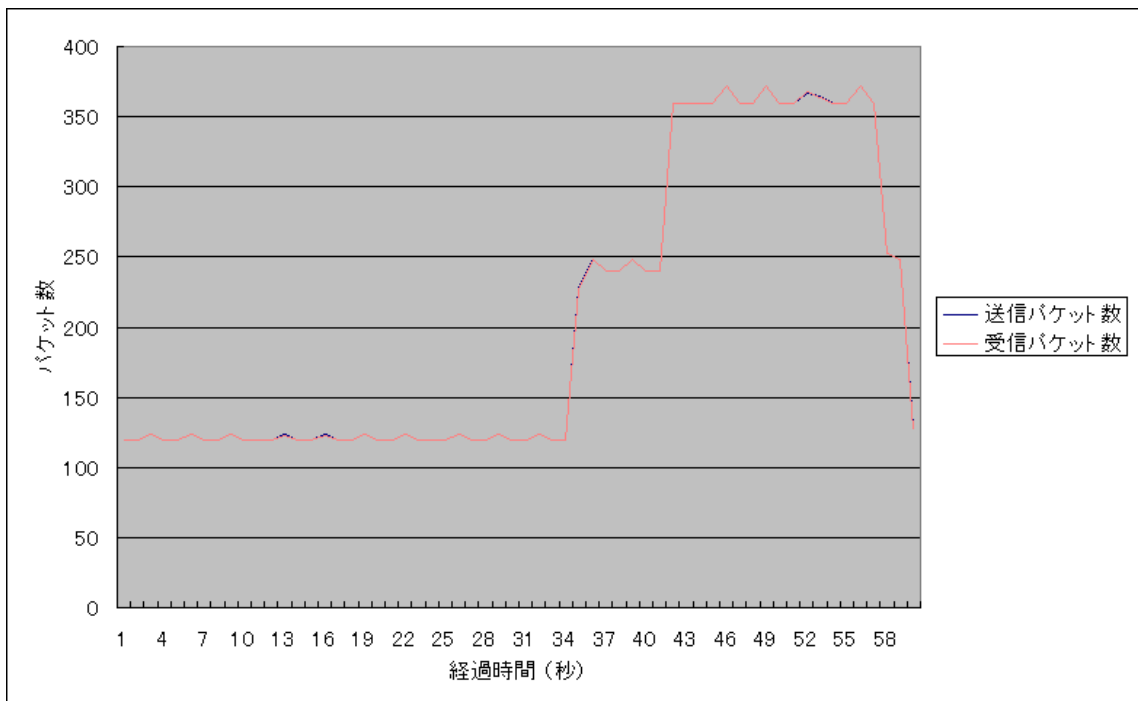


図 14: 符号化レート制御を適用した場合の送信データ量と受信データ量の変化 (ノード D)

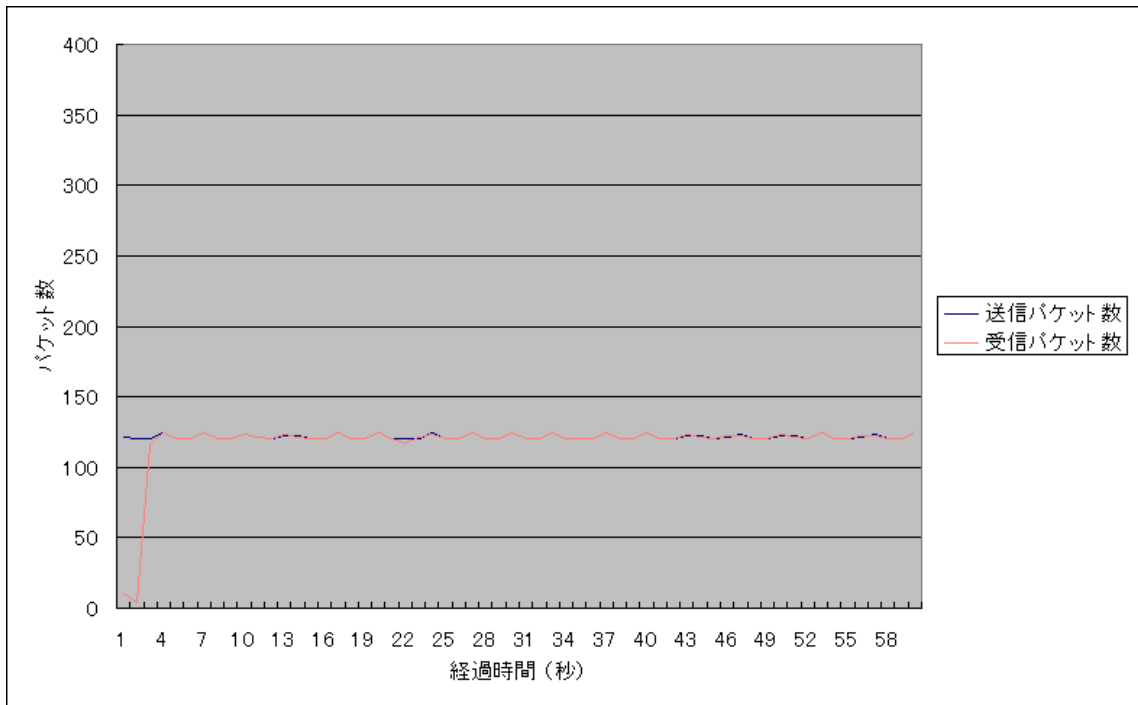


図 15: 常に低画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化 (ノード A)

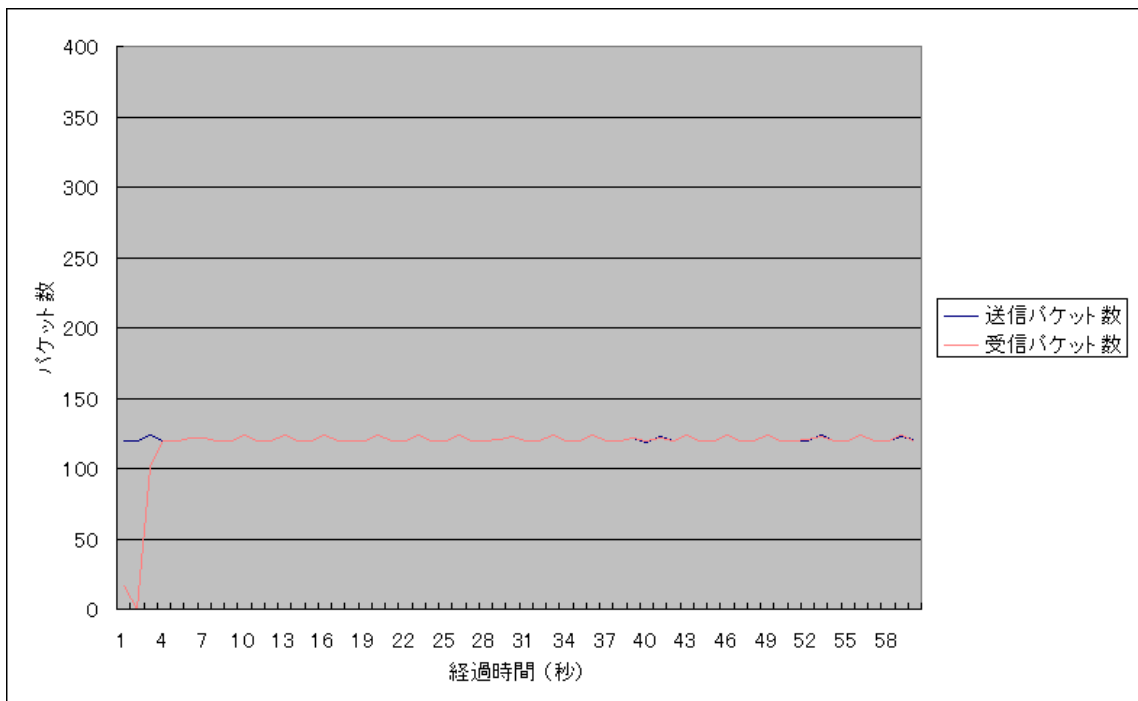


図 16: 常に低画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化 (ノード B)

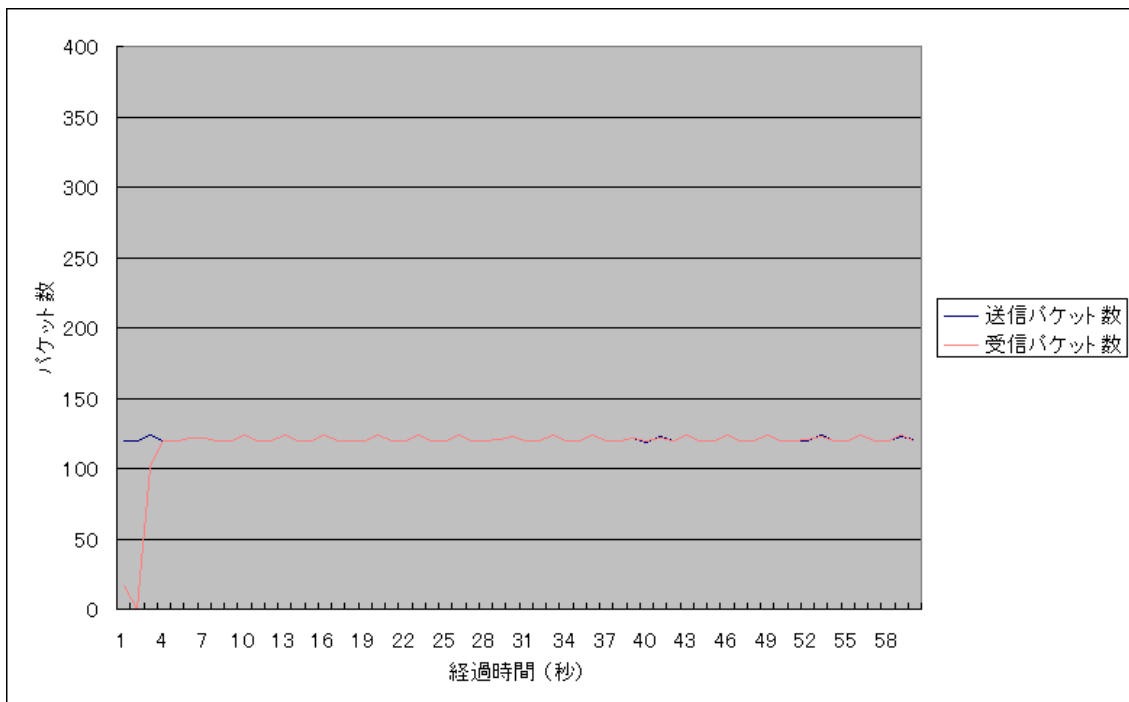


図 17: 常に低画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化 (ノード C)

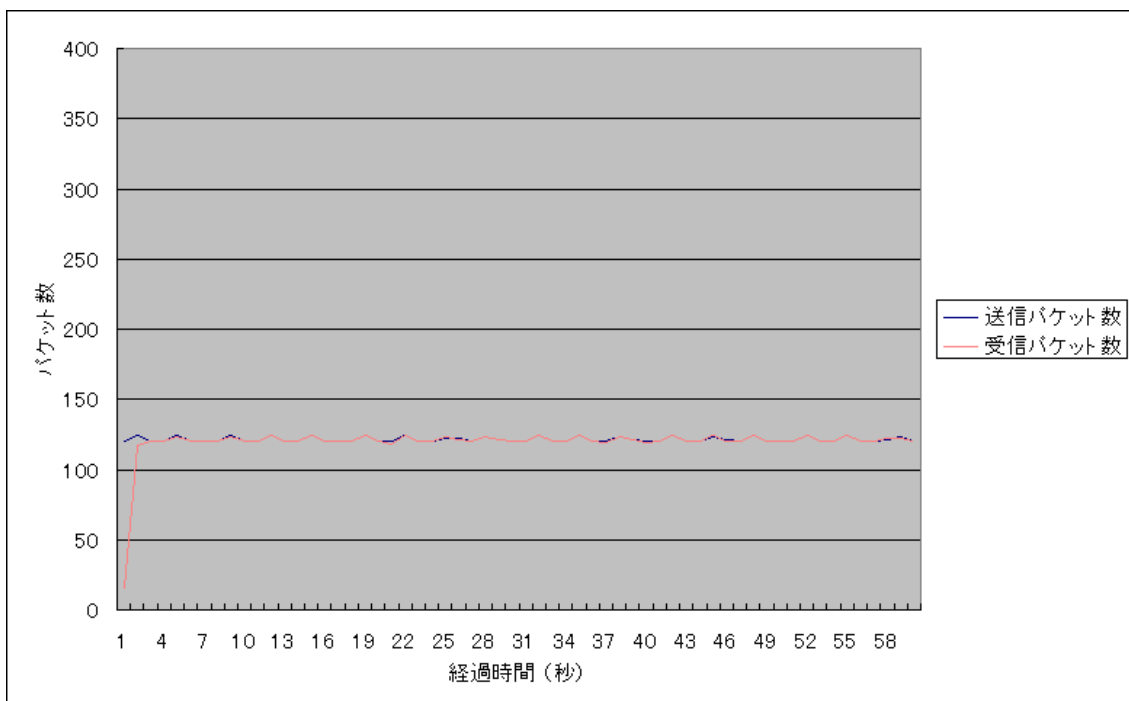


図 18: 常に低画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化 (ノード D)

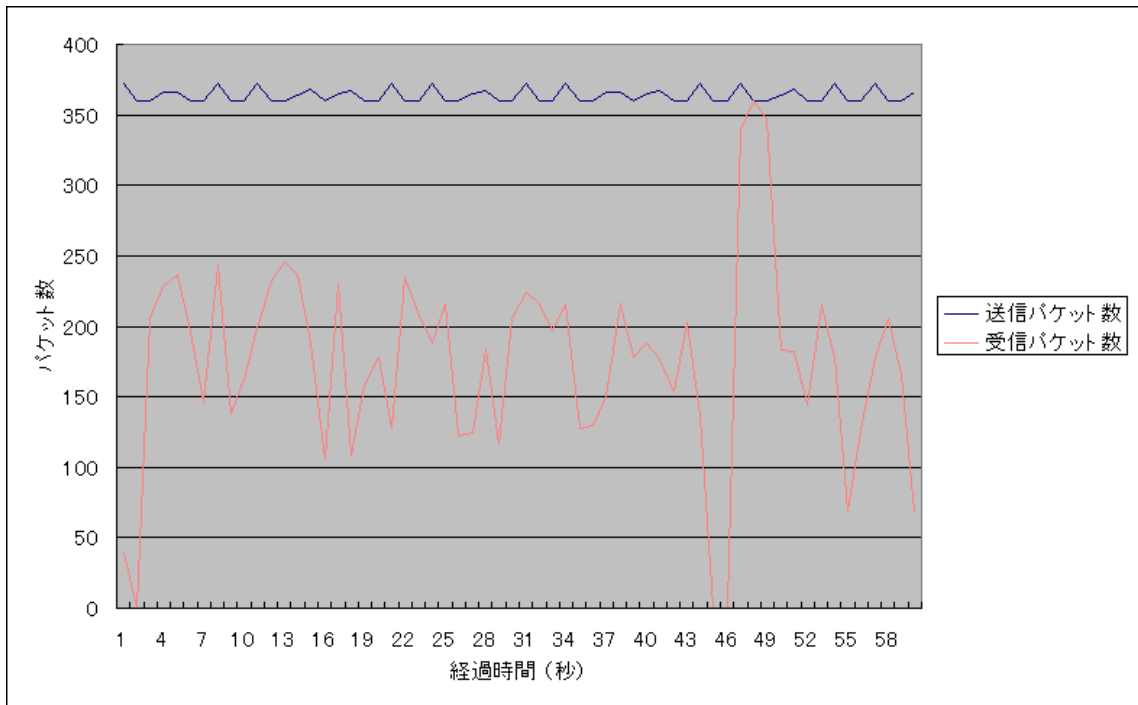


図 19: 常に高画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化 (ノード A)

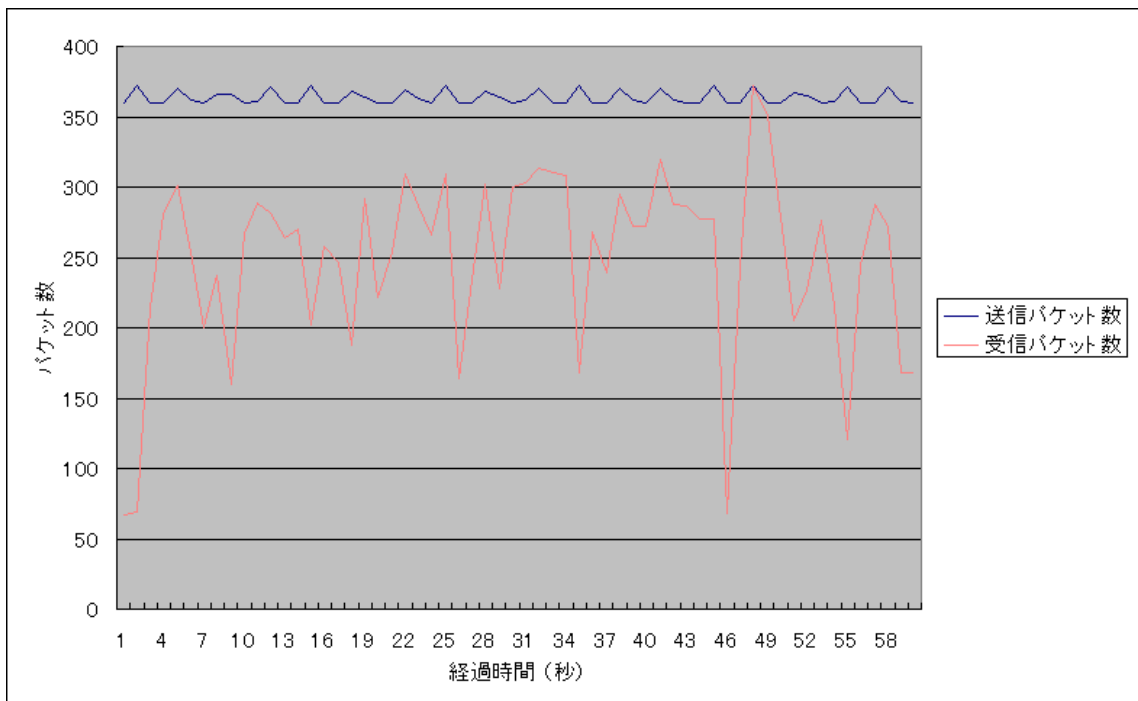


図 20: 常に高画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化 (ノード B)

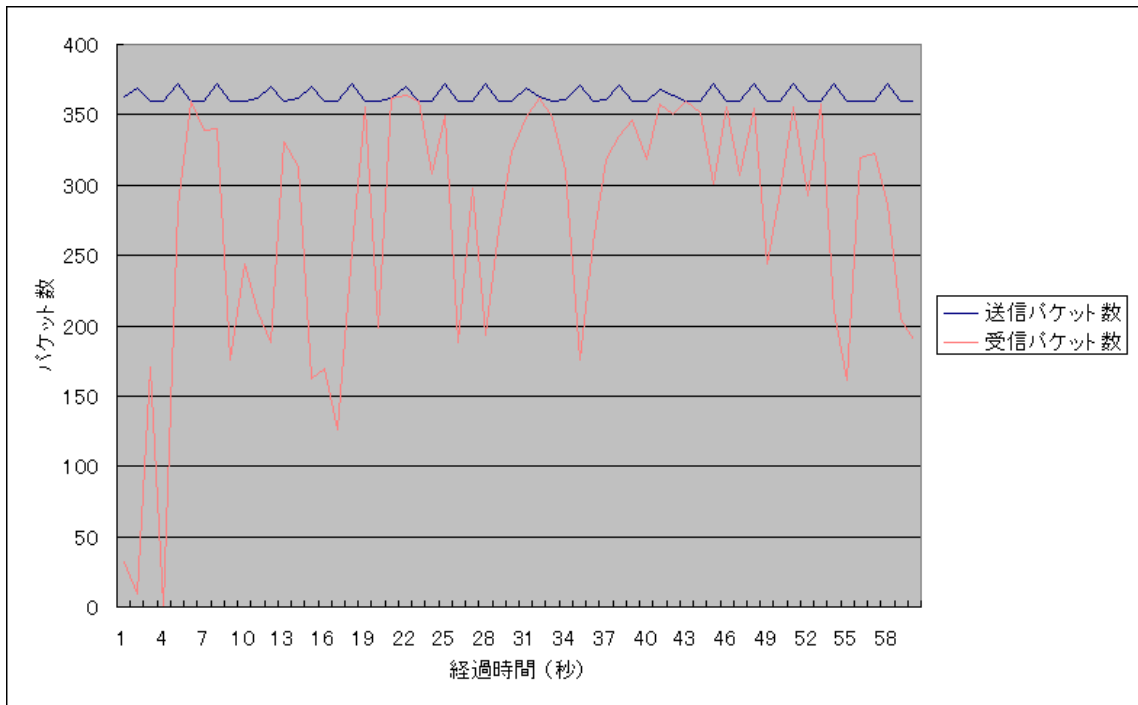


図 21: 常に高画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化 (ノード C)

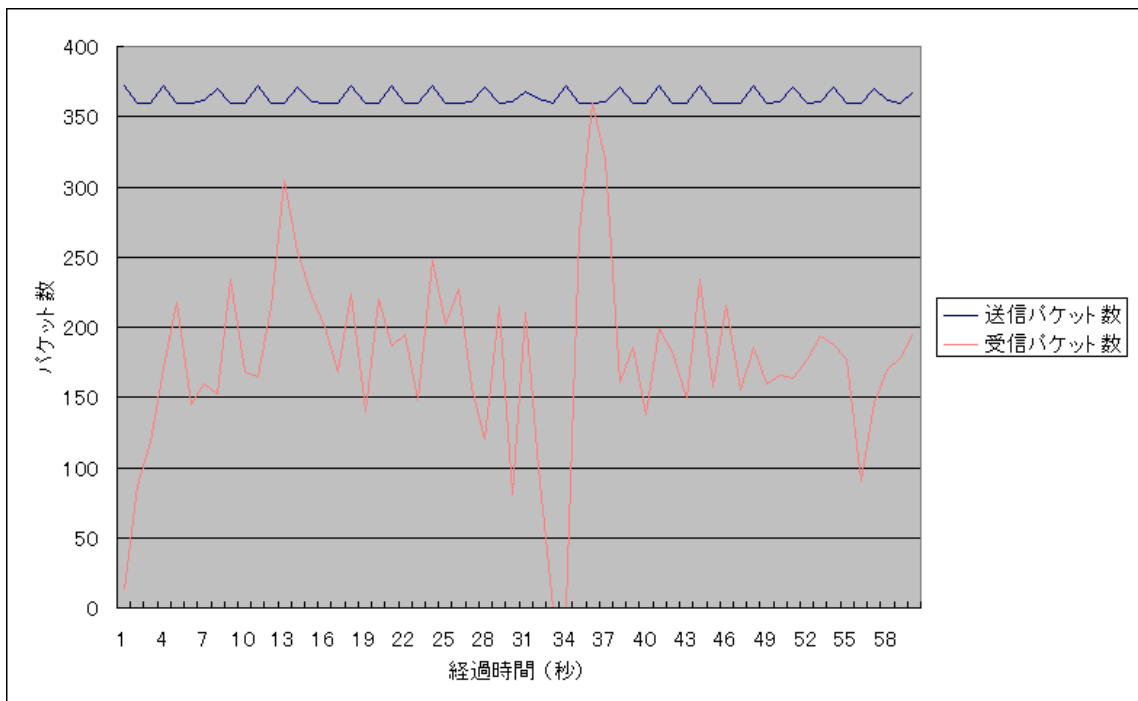


図 22: 常に高画質で符号化した場合の送信データ量と受信データ量の変化 (ノード D)

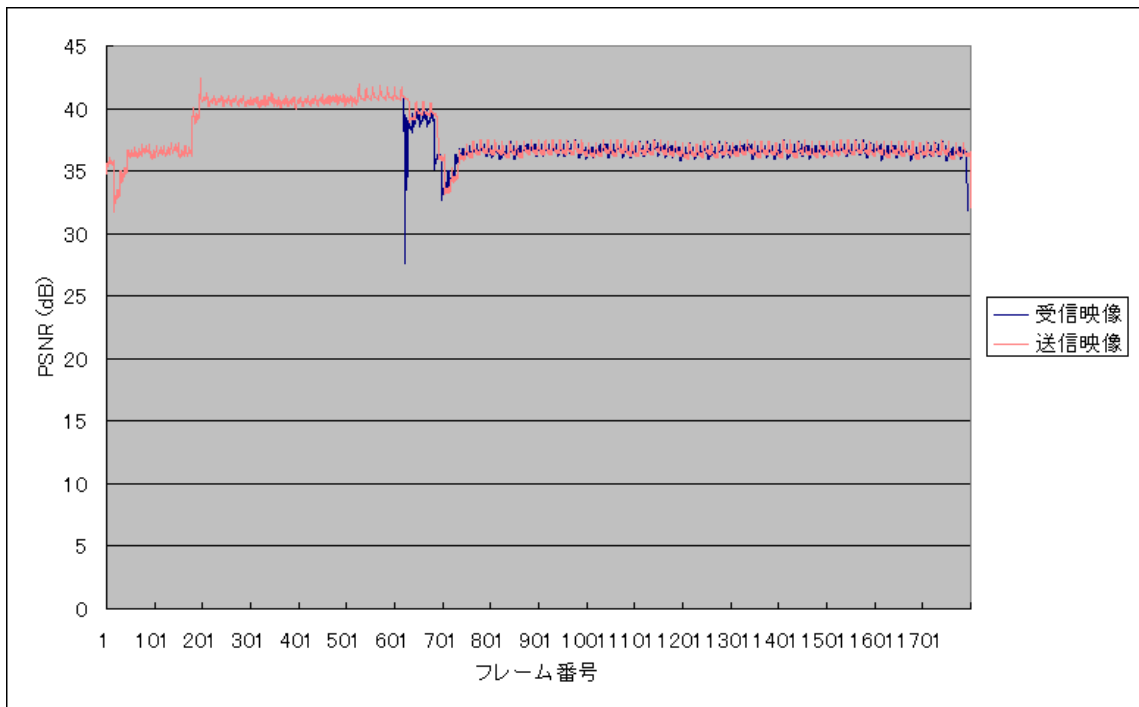


図 23: 符号化レート制御を適用した場合の PSNR の変化 (ノード A)

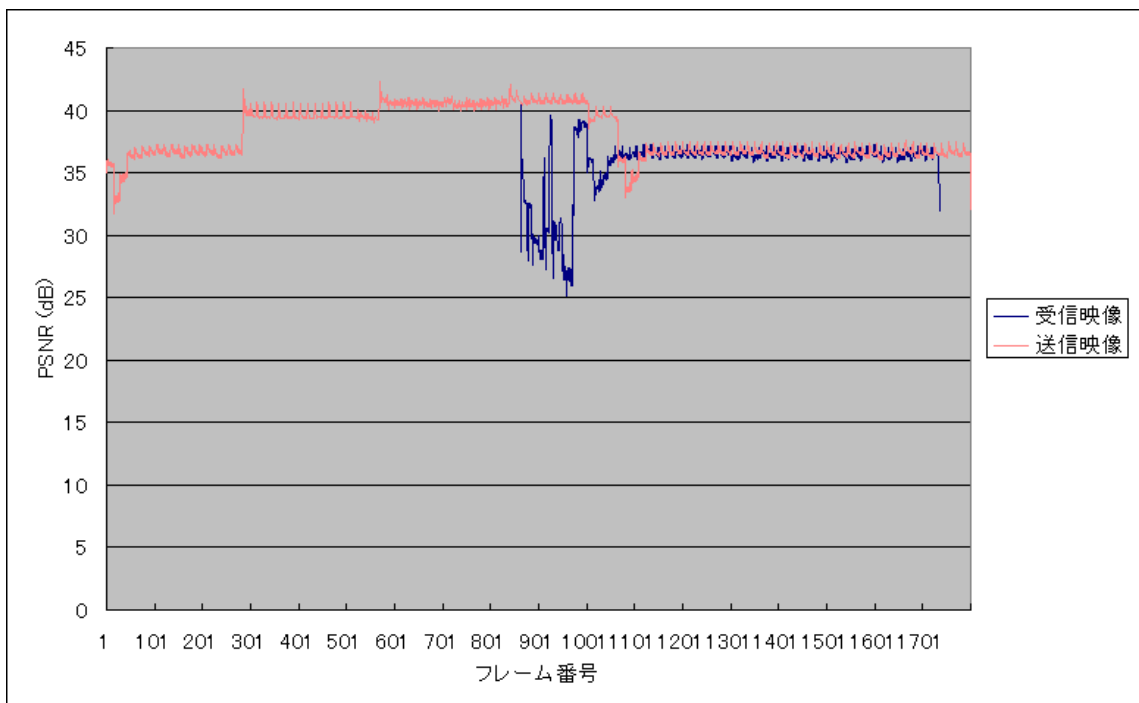


図 24: 符号化レート制御を適用した場合の PSNR の変化 (ノード B)



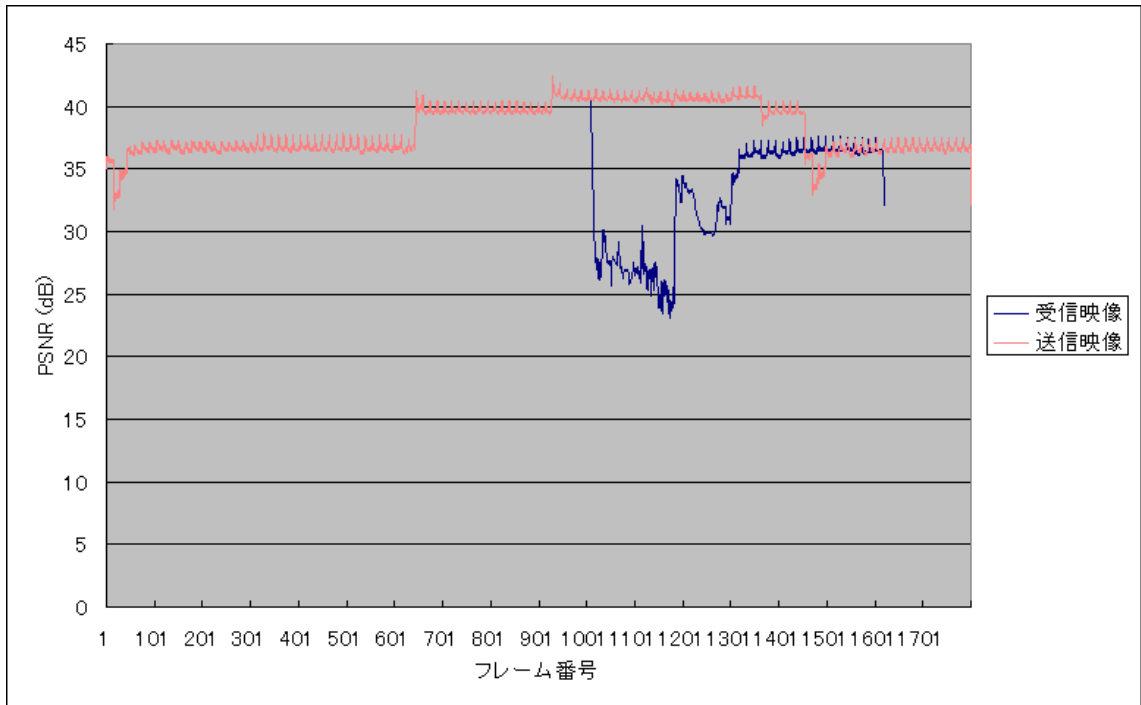


図 25: 符号化レート制御を適用した場合の PSNR の変化 ( ノード C )

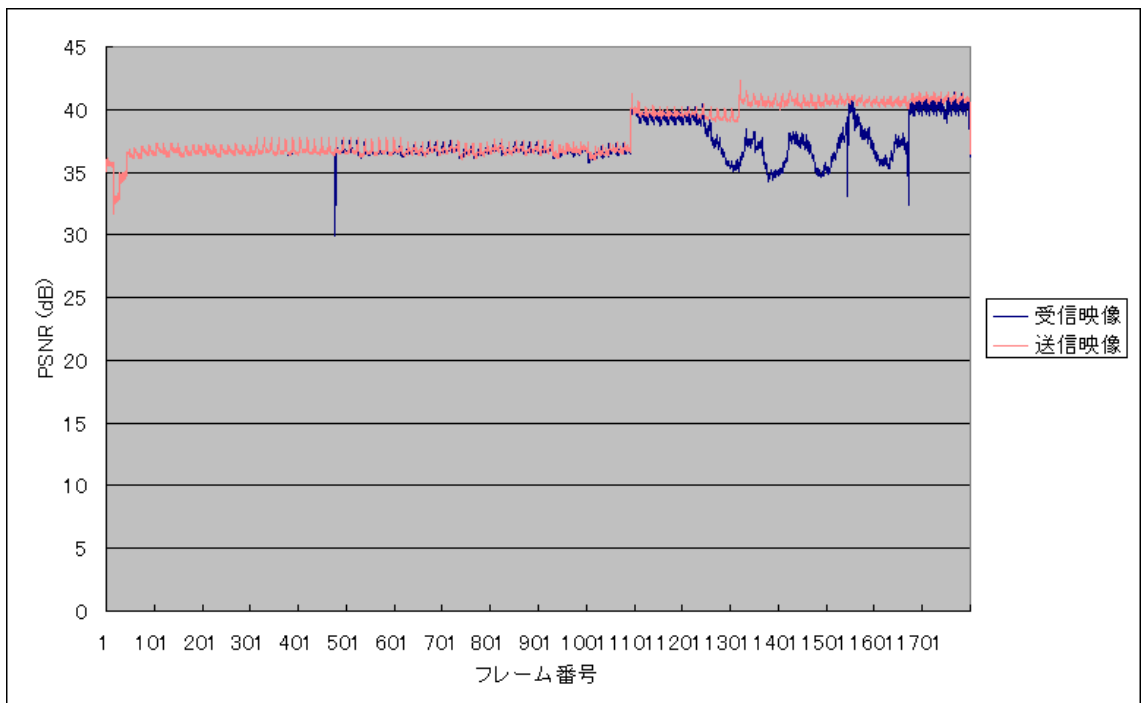


図 26: 符号化レート制御を適用した場合の PSNR の変化 ( ノード D )

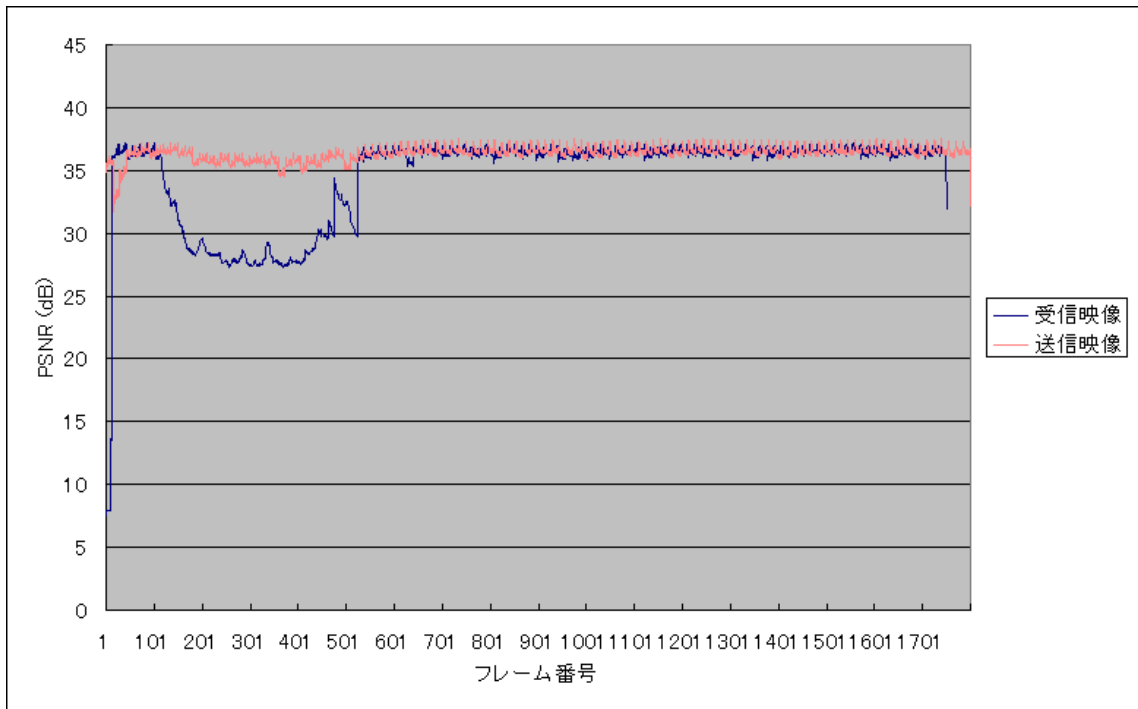


図 27: 常に低画質で符号化した場合の PSNR の変化 (ノード A)

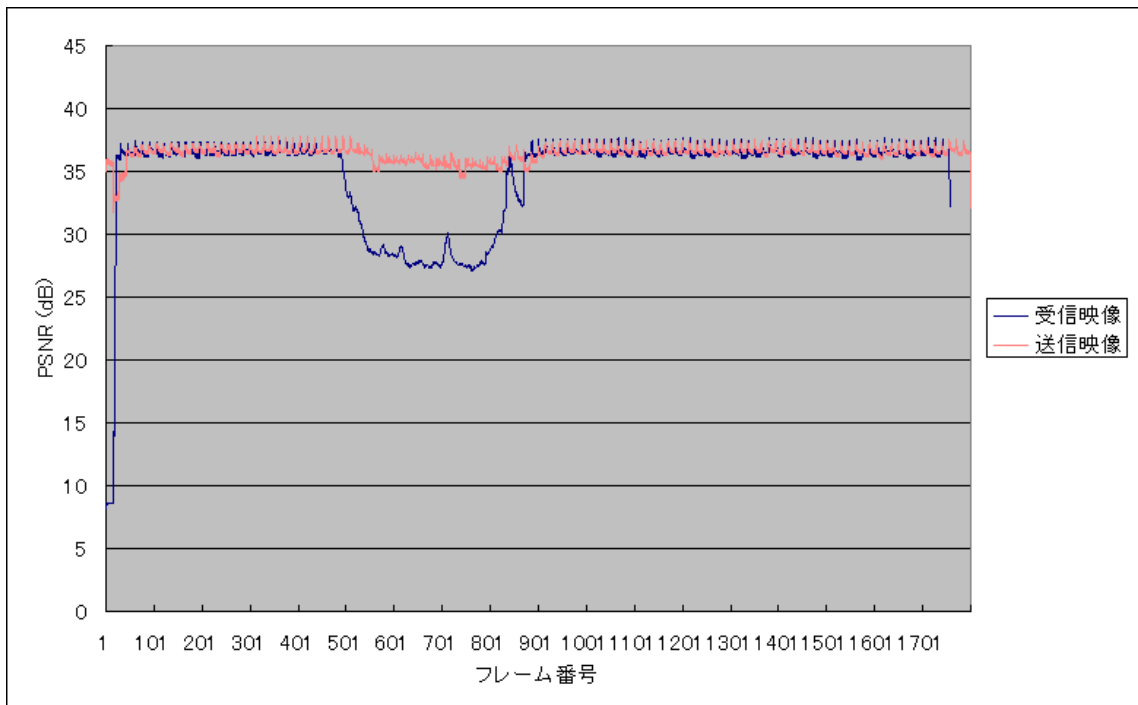


図 28: 常に低画質で符号化した場合の PSNR の変化 (ノード B)

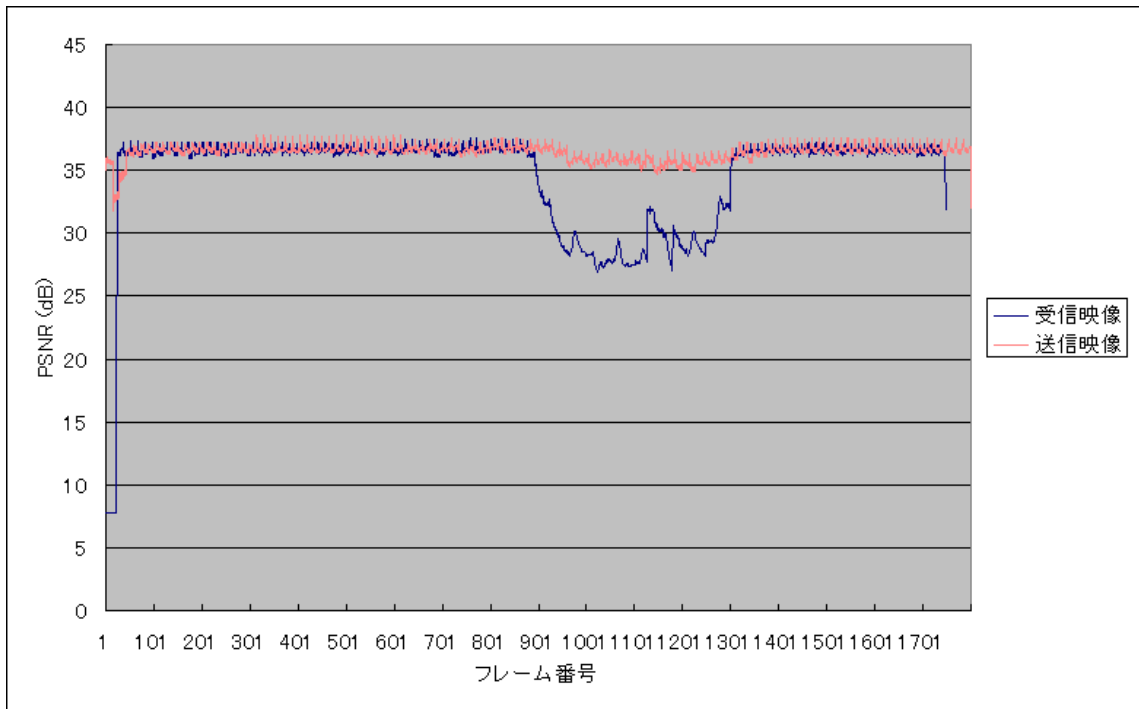


図 29: 常に低画質で符号化した場合の PSNR の変化 (ノード C)

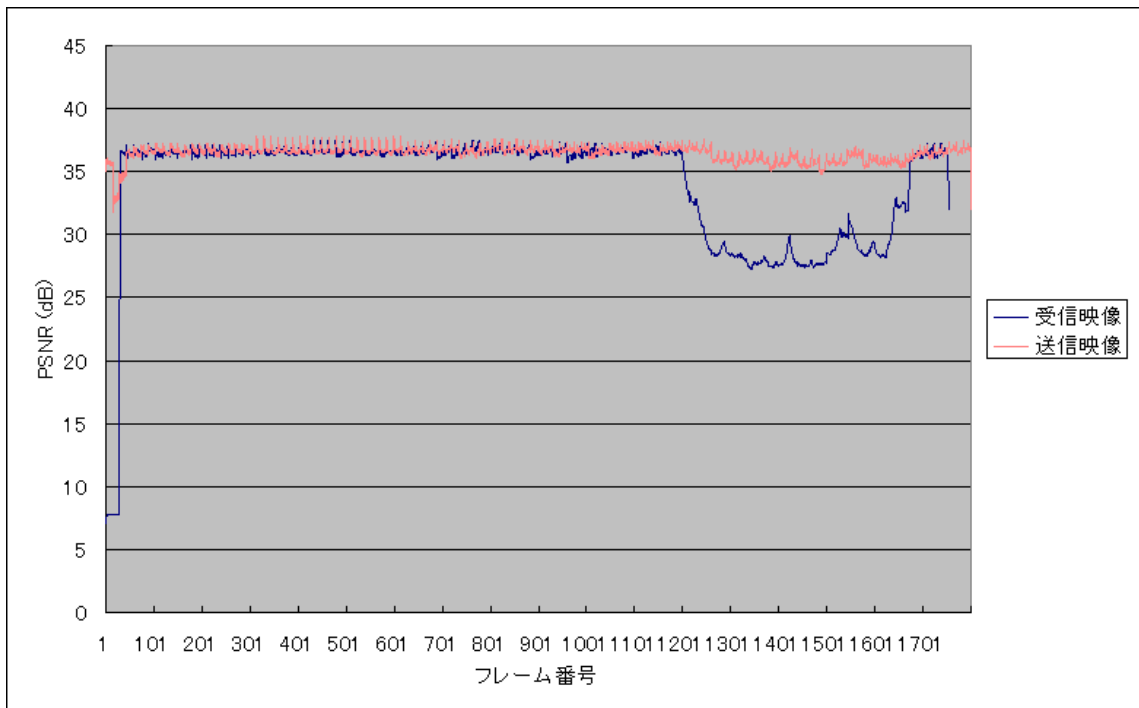


図 30: 常に低画質で符号化した場合の PSNR の変化 (ノード D)

## 5 まとめ

本報告では、カメラセンサー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環境における有効性、実用性を検証するために、市販のカメラとノートパソコンを用いて実装し、実験を行った。パケット棄却率、再生映像品質の観点から評価した結果、通信容量の限られた無線ネットワークにおいて、常に低品質な映像を生成、送信する場合と比較して、本機構を適用することによってパケット棄却率の増加を抑えつつ、再生映像品質を向上できることが明らかとなった。

今後の課題としては以下のものがある。まず、本報告では、特に映像データに対するパケット棄却や符号化レート制御の影響を評価したが、制御情報のやりとりに対するパケット棄却の影響、反応拡散方程式の計算にかかるオーバーヘッド、制御情報や映像データの送受信における遅延などについては評価していない。また、反応拡散モデルにもとづかない他の符号化レート制御手法との比較評価、FEC などを利用した再生映像品質の向上、MAC 制御、経路制御などと組み合わせた際のカメラセンサーネットワーク全体としての性能評価についても今後行う必要がある。

## 謝辞

本報告を終えるにあたり，御指導，御教授をいただきました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授には深く感謝いたします．また，本報告において直接御指導いただきました大阪大学大学院情報科学研究科の若宮直紀准教授には，様々な相談に乗っていただき，多くの助言をいただきました．心よりお礼申し上げます．また平素から適切なお助言をいただいた大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一助教には深く感謝いたします．最後に，本報告のために多くの時間を割いて相談に乗っていただき，支えていただいた村田研究室の皆様方に心からお礼申し上げます．

## 参考文献

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393–422, Mar. 2002.
- [2] I. F. Akyildiz, T. Melodia, and K. R. Chowdhury, “A survey on wireless multimedia sensor networks,” *Computer Networks*, vol. 51, pp. 921–960, Mar. 2007.
- [3] Z. Alliance, “Zigbee specification,” June 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,” in *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01)*, (New York, NY, USA), pp. 61–69, ACM, 2001.
- [5] K. W. Aura Ganz, Zvi Ganz, *Multimedia Wireless Networks: Technologies, Standards and Qos*. Springer, Sept. 2003.
- [6] M. Watson, M. Luby, and L. Vicisano, ““forward error correction (fec) building block”,” *Network Working Group RFC 5052*, Aug. 2007.
- [7] K. Hyodo, N. Wakamiya, and M. Murata, “Reaction-diffusion based autonomous control of camera sensor networks,” in *Proceedings of 2nd International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems (BIONETICS 2007)*, Dec. 2007.
- [8] A. M. Turing, “The chemical basis of morphogenesis,” *Royal Society of London Philosophical Transactions Series B*, vol. 237, pp. 37–72, Aug. 1952.
- [9] 松下貢, 三村昌泰, 関村利朗, 望月敦史, 本多久夫, 生物にみられるパターンとその起源. 東京大学出版会, 2005.
- [10] MSSG, “Mpeg.org.” <http://www.mpeg.org/>.