

# マルチインタフェースアドホックネットワークにおける チャンネル使用状態を考慮した経路制御手法の評価

梶岡 慎輔<sup>†</sup> 若宮 直紀<sup>†</sup> 佐藤 弘起<sup>††</sup> 門田 和也<sup>††</sup> 松井 進<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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

<sup>††</sup> 株式会社 日立製作所 システム開発研究所

〒 244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町 292 番地

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

††{hiroki.satoh,yj,kazuya.monden.vw,susumu.matsui.cb}@hitachi.com

あらまし 無線アドホックネットワークにより、VoIP (Voice over IP) や遠隔監視などのアプリケーションシステムを実現するためには、音声、映像のリアルタイム通信に求められる通信品質を考慮したネットワーク制御が必要となる。我々は、複数の無線ネットワークインタフェースを持つノードからなるアドホックネットワークを対象に、ネットワークの状態にもとづいてアプリケーションの要求する QoS を考慮した経路制御手法を提案している。提案手法では、OLSR を拡張することにより帯域の使用状態に関する情報を効率的に収集し、得られた帯域情報にもとづいて論理経路を決定する。パケットはカプセル化され、論理経路にしたがって受信側ノードに転送される。シミュレーション評価により、95% のパケット配送率と 10 ms 程度のパケット転送遅延を達成できることを示した。さらに、論理経路制御により、リアルタイム通信のトラヒックがネットワーク全体に分散されることを確認した。キーワード アドホックネットワーク、QoS ルーティング、マルチチャンネル、マルチインタフェース。

## Evaluation of a QoS-aware Routing Mechanism for Multi-Channel Multi-Interface Ad-Hoc Networks

Shinsuke KAJIOKA<sup>†</sup>, Naoki WAKAMIYA<sup>†</sup>, Hiroki SATOH<sup>††</sup>, Kazuya MONDEN<sup>††</sup>,

Susumu MATSUI<sup>††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

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

<sup>††</sup> Hitachi, Ltd., System Development Laboratory

292, Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 244-0817, Japan

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

††{hiroki.satoh,yj,kazuya.monden.vw,susumu.matsui.cb}@hitachi.com

**Abstract** To accommodate real-time applications such as VoIP (Voice over IP) or remote monitoring in wireless ad-hoc networks, we need to support certain level of communication quality for real-time audio and video transmissions. We proposed a new routing mechanism for an ad-hoc network composed of nodes equipped with multiple wireless network interfaces to each of which a different wireless channel can be assigned. By embedding information about channel usage in control messages of OLSRv2, each node obtains a view of topology and channel usage of the whole network and establishes an appropriate logical path to a destination node. Through simulation experiments, we confirmed that our mechanism could accomplish the delivery ratio of more than 95% while delay is kept less than 10 ms. Furthermore, real-time traffic is distributed in the whole network by logical QoS routing.

**Key words** ad-hoc network, QoS routing, multi-channel, multi-interface.

## 1. はじめに

無線アドホックネットワークは、アクセスポイント等の固定的な通信設備を必要とせず、ノード間の無線通信によりネットワークを構成できることから、特に、屋外イベントでの一時的な利用など配線コストや機器設置コストが問題となる環境や歴史的建造物など機器設置の制約が大きい環境に適しており、また、大規模災害時など社会情報基盤が停止した際の緊急通信手段としても期待が持たれている。

遠隔監視、タウンモニタリング、VoIP (Voice over IP)、テレビ電話などの音声、映像のリアルタイム通信を伴うアプリケーションにおいては、遅延や帯域などに関する QoS が要求されることから、無線アドホックネットワークにおける QoS 制御について、これまで多数の研究が行われている [1-3]。例えば [3] では、ノード間で利用可能帯域およびパケット転送遅延を計測し、計測結果を経路制御のメトリックに用いることで、広帯域、低遅延の通信を実現し、QoS 制御を行わない OLSR と比較してパケット棄却率が半減することを示している。また、単一の無線チャネルを用いたマルチホップ通信では、音声、映像トラヒックの収容に十分なスループットを得られないため [4, 5]、ノードが複数の無線チャネルを組み合わせ、あるいは切り替えて使用することにより、無線チャネルあたりのスループットを向上させる研究が進められている [6-9]。

我々の研究グループでは、それぞれ異なる無線チャネルが割り当て可能な複数の無線ネットワークインタフェースを有するノードからなるアドホックネットワークにおいて、アプリケーションの QoS 要求を考慮した通信を実現するための、経路制御手法について提案している [10]。提案手法では、利用可能な無線チャネルのうち、ネットワーク全体で共通の 1 つをベストエフォート通信に、残りのチャネルを音声や映像などのリアルタイム通信に用いる。ベストエフォート通信チャンネル上ではアドホックネットワーク経路制御プロトコルが動作しており、ベストエフォートトラヒックの経路を定める。一方、リアルタイム通信のためには、QoS を考慮した経路制御プロトコルをそれぞれの無線チャネルで独立動作させることなく、複数の無線チャネルを統合的に利用する経路制御を行う。具体的には、送信側ノードは、リアルタイムトラヒックの転送要求が発生すると、アプリケーションの要求する QoS と、ベストエフォート通信チャンネルの経路制御プロトコルによって収集されるネットワーク全体の帯域使用状態にもとづいて、パケットの転送経路を決定する。この経路を論理経路と呼ぶ。パケットは論理経路上の中継ノードを宛先としてカプセル化され、リアルタイム通信チャンネル上を、ベストエフォート通信チャンネルの経路制御プロトコルによって決定された経路 (物理経路と呼ぶ) を通って、順次転送される。さらに、複数のリアルタイム通信チャンネルを効率的に利用するため、中継ノードでは、パケットごとに最も空いている無線チャネルを選択し、パケットを転送する。本稿では、シミュレーションによりこの提案手法の有効性を示す。

以降、2 章では、我々の研究グループで提案したマルチインタフェースアドホックネットワークのための経路制御手法の概

要を述べ、3 章において提案手法のモジュール構成やそれぞれのモジュールの動作を述べる。4 章でシミュレーション結果を示し、提案手法の有効性について考察する。最後に 5 章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

## 2. チャネル使用状態を考慮した経路制御手法の概要

### 2.1 対象とするアドホックネットワーク

本稿では、それぞれ異なる無線チャネルを割り当て可能な  $M$  個の無線ネットワークインタフェースを有するノードからなる無線アドホックネットワークを対象とする。利用可能なチャネルの数  $K$  ( $2 \leq K \leq M$ ) や周波数はすべてのノードで等しいものとする。いったん設置されたノードは頻繁には動かされないものとし、少なくともあるノード間でリアルタイム通信が行われている間はいずれのノードも移動しない。ただし、無線通信環境の変化などにより、帯域変動や、単方向リンク、リンク切れが発生する。

### 2.2 無線チャネルの割り当て

提案手法では、利用可能な  $K$  チャネルのうち、1 チャネル (チャネル番号 0 とする) をベストエフォート通信チャンネル、残りの  $K-1$  チャネル (チャネル番号 1~ $K-1$  とする) をリアルタイム通信チャンネルとする。ベストエフォート通信チャンネルでは経路制御プロトコルとして OLSRv2 [11] が動作する。

無線ネットワークインタフェースには、無線チャネルと IP アドレスが固定的に割り当てられる。 $M \leq K$  の場合には、ネットワーク全体で共通の  $M$  チャネルを選択して、ノード上では無線ネットワークインタフェースごとに異なる無線チャネルを割り当てる。一方、 $M > K$  の場合には複数の無線ネットワークインタフェースに同じチャネルを割り当てることになるが、それぞれ異なるネットワークアドレスを用いるものとする。IP アドレスのホストアドレス部は同一ノードの無線ネットワークインタフェース間で共通とし、ネットワークアドレス部は割り当てられた無線チャネルに対応づけられる。例えば、4 つの無線ネットワークインタフェースを有するノード 1 の IP アドレスはそれぞれ 192.168.0.1/24, 192.168.1.1/24, 192.168.2.1/24, 192.168.3.1/24, 同じくノード 2 の IP アドレスはそれぞれ 192.168.0.2/24, 192.168.1.2/24, 192.168.2.2/24, 192.168.3.2/24 となり、192.168.0.\* から 192.168.3.\* はそれぞれチャネル 0 からチャネル 3 に対応づけられる。この例においてノード 1 からノード 2 へチャネル 3 を用いてパケットを送信したいときには、送信側 IP アドレスは 192.168.3.1, 受信側 IP アドレスは 192.168.3.2 となる。

### 2.3 帯域情報の取得、伝播

ノードはリアルタイム通信チャンネルの使用状態を監視し、リアルタイム通信に利用可能な帯域を推定する [5, 12]。ここでは、制御を簡便にするため、次式により、ノード  $k$  におけるチャネル  $c$  ( $1 \leq c \leq K-1$ ) の利用可能帯域  $B_k(c)$  を算出する。

$$B_k(c) = W_k(c) - D_k(c)/T. \quad (1)$$

$W_k(c)$  はノード  $k$  上のチャネル  $c$  の理想的な通信容量であり、

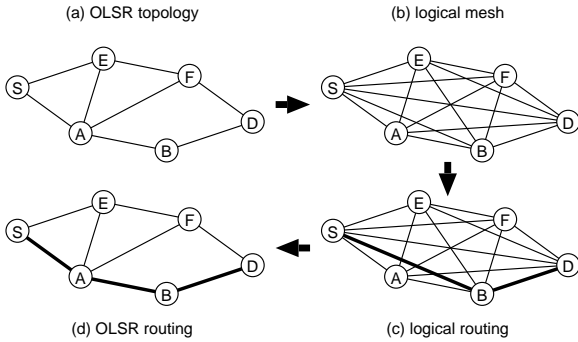


図 1 提案手法による論理経路制御

Fig. 1 Physical routing and logical routing.

例えば IEEE 802.11g では 54 Mbps とする。\$T\$ は推定周期であり、\$D\_k(c)\$ は推定周期内にノード \$k\$ がチャンネル \$c\$ を用いて送受信した総データ量である。ノード \$k\$ におけるリアルタイム通信の総利用可能帯域 \$B\_k\$ は、次式で与えられる。

$$B_k = \sum_{c=1}^{K-1} B_k(c). \quad (2)$$

また、利用可能帯域に関する情報（以降では帯域情報と呼ぶ）は、OLSRv2 の制御メッセージである HELLO メッセージおよび TC メッセージの拡張領域（メッセージ TLV ブロック）に新たなフィールドを設けて付加することにより、ネットワーク全体で共有される。

#### 2.4 論理ルーティング

送信側ノードはリアルタイム通信要求が発生すると、OLSRv2 における制御メッセージの交換によって得られるトポロジ情報をもとに論理的なメッシュ網を構築する（図 1 右上）。メッシュ論理網におけるノード \$i, j\$ 間の論理リンクは OLSRv2 におけるノード \$i, j\$ 間の最短経路と対応付けられ、論理リンクの利用可能帯域 \$B(i, j)\$ は、その最短経路における物理リンクの最小利用可能帯域とする。最短経路が複数存在する場合は、その中で利用可能帯域が最大となる経路を論理リンクと対応付ける。

次に、構築したメッシュ論理網において、アプリケーションの要求する QoS を考慮した論理経路を選択する。論理経路の選択にはさまざまなものが利用可能であるが [13, 14]、提案手法では簡単なヒューリスティックを用いる。具体的には、論理メッシュ上でホップ数が \$H\$ 以下のすべての論理経路を求め、論理経路上の論理リンクのうち最小の利用可能帯域をその論理経路の利用可能帯域とし、すべての論理経路の中から最も利用可能帯域が大きい論理経路を選択する。利用可能帯域最大の論理経路が複数ある場合には物理ホップ数が最も小さいものを選択する。なお、100 ノードからなる無線アドホックネットワークにおいては、\$H\$ は 3 程度で利用可能帯域が最大で物理ホップ数が小さい論理経路を発見可能であった。

リアルタイム通信の packets は、論理経路の中継ノードアドレスでカプセル化された後、リアルタイム通信チャンネルにおいて送出される。例えば図 1 のように、送信側ノード \$S\$ から受信側ノード \$D\$ への論理経路の最初の中継ノードがノード \$B\$ である場合、送信側ノードから送出される packets の宛先 IP アド

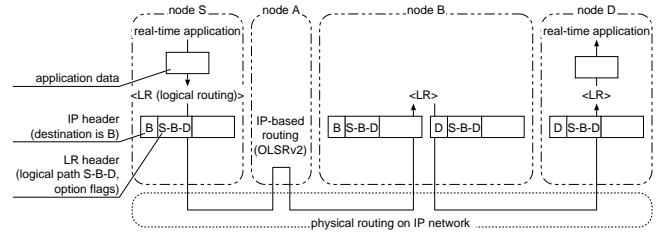


図 2 通信の様子

Fig. 2 Transmission flow.

ドレスはノード \$B\$ のものとなる。

中継ノードは、ベストエフォート通信チャンネルで packets を受信した場合は、通常の実受、転送処理を行う。一方、リアルタイム通信チャンネルで packets を受信した場合は、宛先 IP アドレスが自ノードであれば、宛先 IP アドレスを論理経路上の次ホップノードの IP アドレスに変更して packets を送出、あるいは自ノードが最終的な宛先であれば受信処理を行う。また、宛先 IP アドレスが自ノードでなければ、リアルタイム通信用に割り当てられたチャンネルのうち最も空いているものを用いて packets を転送する。なお、論理経路上の中継ノード間では、ベストエフォート通信チャンネル上の経路制御プロトコルに従った論理経路上で packets 転送が行われる（図 1 左下）。図 1 における通信の様子を図 2 に示す。

### 3. 提案手法のモジュール構成

図 3 に提案手法のモジュール構成を示す。図では、リアルタイム通信に無線チャンネル 1~3 を割り当てている。以降では、LR, SW, および OLSR モジュールの動作を簡単に述べる。

#### 3.1 LR モジュールの動作

LR モジュールはリアルタイム通信のための論理ルーティングを行う。LR モジュールはリアルタイムアプリケーションから packets を受信すると、packets の宛先 IP アドレスと宛先ポート番号から packets の属するセッションを識別する。新しいセッションであれば、トポロジ情報にもとづいて論理経路を構築する。そのため、LR モジュールは定期的に OLSR モジュールへトポロジ情報要求メッセージを送信し、帯域情報を含むトポロジ情報を取得する。シミュレーションでは、トポロジ情報要求メッセージの送信間隔を OLSRv2 における TC メッセージの送信間隔と同じ 5 秒とした。

論理経路に関する情報は LR ヘッダとして packets の先頭に追加される。LR ヘッダの構成を図 4 に示す。LR ヘッダは上位 12 バイトのヘッダ情報と論理経路情報で構成される。ヘッダ情報のフィールドには、LR ヘッダ識別子、メッセージタイプ、論理経路長、メッセージ長、送信側・受信側アプリケーションのポート番号が、また、論理経路情報のフィールドには、送信側ノードから順に、ノードの IP アドレスと、そのノードを packets が通過したかどうか、またはノードが受信側ノードであるかどうかを示すフラグが格納される。LR モジュールは、packets をカプセル化した後に SW モジュールに渡す。

また、LR モジュールはソフトステート型のセッション状態

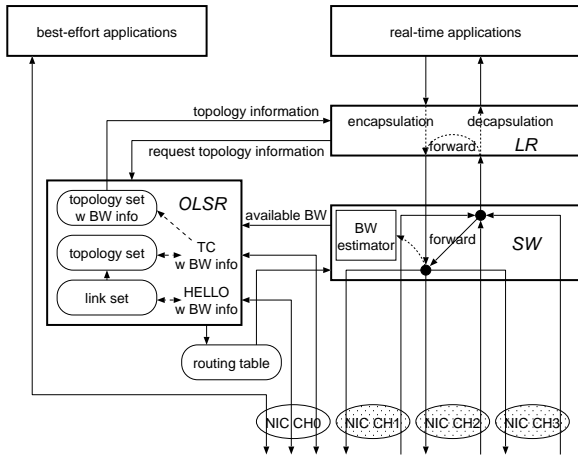


図 3 提案手法のモジュール構成

Fig. 3 Module components of proposed system.

管理を行っている。セッション識別子, LR ヘッド, 参照時刻をセッション管理テーブルで管理し, 同じセッションに属するパケットを同じ LR ヘッドでカプセル化する。また, 30 秒間参照されなかったセッション識別子のエントリは破棄する。

LR モジュールは SW モジュールからパケットを受信すると, LR ヘッドの論理経路情報に含まれる自ノードアドレスのフラグを参照する。自ノードが受信側ノードであれば LR ヘッドをすべて取り除き, LR ヘッドに指定された宛先ポートを通じてアプリケーションにパケットを渡す。一方, 自ノードが受信側ノードでない場合には, 自ノードのフラグを既達とし, パケットを SW モジュールに渡す。

### 3.2 SW モジュールの動作

SW モジュールは, LR モジュールとのパケット交換, OLSRv2 の定めた物理経路にもとづくパケット転送, パケット送信チャネルの選択, および利用可能帯域の推定と OLSR モジュールへの通知を行う。

SW モジュールは LR モジュールからカプセル化されたパケットを受信すると, まず LR ヘッドから論理経路上の次ホップノードのアドレスを取得する。次に, OLSR モジュールによって管理される経路表を参照し, 論理経路上の次ホップノードを宛先とするパケット転送先ノードのホストアドレスを得る。続いて, 利用可能帯域の推定周期内において最も使用されていないリアルタイム通信チャネルのネットワークアドレスを得る。このネットワークアドレスと先に得た転送先ノードのホストアドレスを組み合わせたものを宛先 IP アドレスとして IP ヘッドを生成し, パケットを送信する。なお, 用いたチャネルの送信データ量を, 送信したパケットサイズにより更新する。

一方, 無線ネットワークインタフェースからパケットを受信した場合は, LR ヘッドを参照し, 論理経路上の次ホップノードが自ノードでない場合には, 物理経路にもとづいたパケット転送処理を行う。論理経路上の次ホップノードが自ノードである場合には, 受信したパケットを LR モジュールに渡す。

また, SW モジュールは, 周期的にノードの利用可能帯域  $B_k$  を推定し, OLSR モジュールに通知するとともに, すべての

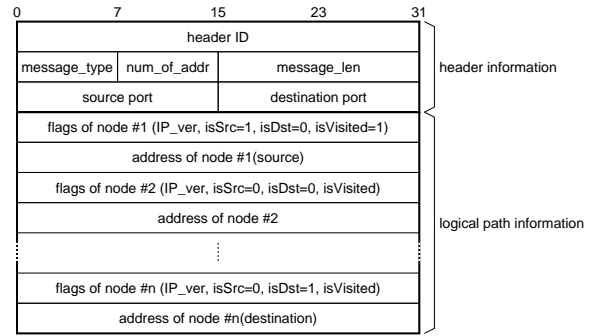


図 4 LR ヘッドフォーマット

Fig. 4 LR header format.

チャネルの送信データ量  $D_k(c)$  を 0 に初期化し, 新たな推定周期を開始する。シミュレーションでは, 推定周期を OLSRv2 の HELLO メッセージ送信周期である 2 秒とした。

### 3.3 OLSR モジュールの動作

OLSR モジュールでは, 帯域情報を扱えるように拡張した OLSRv2 が動作する。OLSR モジュールは, SW モジュールによって推定される自ノードの利用可能帯域と, 制御メッセージにより取得される他のノードの利用可能帯域に関する情報を, IP アドレスとともにテーブルとして保持する。OLSR モジュールは, HELLO メッセージ, TC メッセージを生成する際に, 拡張領域 (メッセージ TLV ブロック) にノードごとの帯域情報を付加する。LR モジュールからトポロジ情報要求メッセージを受信すると, OLSRv2 の生成, 管理するトポロジ情報とノードの帯域情報を組み合わせ, LR モジュールに提供する。

## 4. シミュレーション評価

提案手法の有効性を確認するため, シミュレーション評価を行った。本章では, 提案手法のシミュレーション評価方法を述べ, シミュレーション結果を示すとともに考察する。

### 4.1 シミュレーション評価方法

シミュレータには QualNet 4.0 を用いた [15]。OLSR モジュールは新潟大学の OLSRv2 プロジェクト [16] にて公開されているものを利用して作成した。

100 台のノードを  $1000 \times 1000 \text{ m}^2$  の領域に格子状に配置した。ノードは無指向性アンテナを有する 4 つの IEEE 802.11g 無線ネットワークインタフェースを持ち, リアルタイム通信チャネルに 3 チャネル, ベストエフォート通信チャネルに 1 チャネルを割り当てた。なお, 4 チャネルは互いに干渉を与えないものとする。ノードは距離 153 m 以内の隣接 8 ノードと 54 Mb/s で通信が行える。また, 電波の干渉範囲を半径 289 m とした (近傍 24 ノードと干渉)。なお, 経路損失モデルはフリースペースモデル, シャドウイングはなし, フェージングはなしとし, IP キューは実在する無線ネットワークインタフェースと同様に 50,000 バイトの FIFO とした。

リアルタイム通信アプリケーションとしては 1 セッションあたり 64 kb/s の VoIP トラフィックを想定し, 送信側ノードは 172 バイト (音声データ 160 バイト, RTP ヘッド 12 バイト) のパ

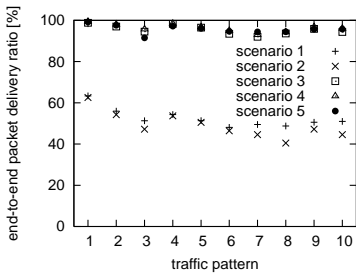


図 5 平均パケット配送率

Fig. 5 Comparison of average packet delivery ratio.

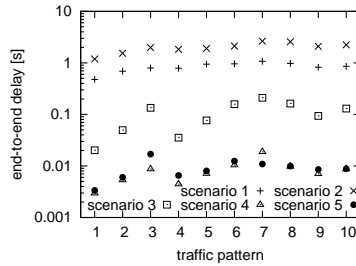


図 6 平均パケット転送遅延

Fig. 6 Comparison of average packet transmission delay.

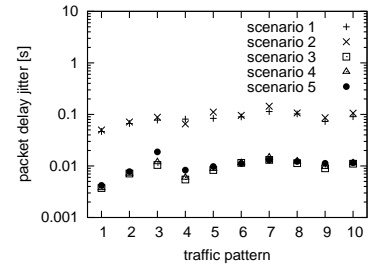


図 7 平均遅延ジッタ

Fig. 7 Comparison of average delay jitter.

表 1 シミュレーションシナリオ

Table 1 Simulation scenarios.

シナリオ 番号	無線ネットワーク インタフェース数	論理経路 制御状態	チャンネル 制御状態
1	1	N/A	N/A
2	2	非動作	N/A
3	4	非動作	送信時ランダムに選択
4	4	非動作	ホップごとに選択
5	4	動作	ホップごとに選択

ケットを 20 ms おきに生成する。すべての生成パケットに対する受信側ノードでの受信パケットの割合（パケット配送率）の平均値，送信側ノードから受信側ノードまでのパケット転送遅延の平均値，および遅延ジッタの平均値を評価尺度として用いる。シミュレーションではランダムに選択した 80 ペアの送受信ノードの間にセッションを設定した。セッションはシミュレーション時刻 30 秒から 90 秒までのランダムな時刻に発生し，60 秒間継続する。シミュレーション時間はすべてのセッションがパケットの送信を終了した後，5 秒のガード期間を設けて 155 秒間とした。以降では，10 種類のトラフィックパターン（80 ペアの組合せ）に関する結果を示す。

提案手法の効果を確認するため，利用可能な無線チャンネル数や制御の組合せの異なる 5 つのシナリオについて評価を行った（表 1）。シナリオ 1 では，ノードが単一のインタフェース，無線チャンネルしか利用できない環境を想定しており，OLSRv2 の制御メッセージとリアルタイムトラフィックが同一チャンネルで収容される。シナリオ 2 では，ノードは 2 つのインタフェースを有し，そのうち 1 つをベストエフォート通信チャンネルに，もう 1 つをリアルタイム通信チャンネルに割り当て，OLSRv2 の制御メッセージとリアルタイムトラフィックが別々の無線チャンネルで転送される。なお，リアルタイム通信チャンネルでは経路制御プロトコルが動作していないため，OLSRv2 の経路に従って転送されるよう，パケットをカプセル化しなければならない。シナリオ 3 では，リアルタイム通信チャンネル数を 3 チャンネルに増加させている。リアルタイムトラフィックのパケットは，セッションごとに送信側ノードでリアルタイム通信チャンネルから選択された無線チャンネルを用い，受信側ノードまで OLSRv2 の経路制御に従って転送される。シナリオ 4 では，リアルタイムトラフィックのパケットは，ホップごとにもっとも空いているリアル

タイム通信チャンネルを用いて転送される。シナリオ 1~4 では，リアルタイムトラフィックは OLSRv2 によって構築される物理経路を通して受信側ノードに転送されるが，シナリオ 5 では，送信側ノードにおいて帯域情報にもとづく論理経路制御を行う。

#### 4.2 シミュレーション結果と考察

平均パケット配送率を図 5 に，平均パケット転送遅延を図 6 に，平均遅延ジッタを図 7 にそれぞれ示す。横軸は平均物理ホップ数の小さい順に並べたトラフィックパターンである。

図 5, 6 より，シナリオ 1 に対して OLSRv2 とリアルタイム通信のチャンネルを分けたシナリオ 2 の方が，平均パケット配送率および平均パケット転送遅延に関する性能が若干低下していることがわかる。これは，経路制御プロトコルが動作していないリアルタイム通信チャンネルにおいてパケット転送を行うためのカプセル化処理のオーバーヘッドによるものと考えられる。本稿では示さないが，経路制御プロトコルを動作させない場合，単位時間あたりの送信可能データ量は，シナリオ 1 と比較して 15% 程度増加する。しかしながら，シミュレーションではパケットカプセル化のオーバーヘッドにより送信可能データ量が 22% 減少するため，平均パケット配送率および平均パケット転送遅延に関する性能が若干低下した。

リアルタイム通信チャンネルを増やしたシナリオ 3 では，シナリオ 1, 2 に対して大きな性能向上が達成できており，平均パケット配送率は約 50% から 92% 以上に，平均パケット転送遅延および平均遅延ジッタは約 10 分の 1 になっている。また，図には示さないが，3 つのリアルタイム通信チャンネルが利用可能なことから，同程度のパケット配送率において，シナリオ 3 ではシナリオ 2 と比較して 3 倍程度のトラフィックを収容できている。

さらに，中継ノードで最も空いているリアルタイム通信チャンネルを選択することにより（シナリオ 4），チャンネル使用量の偏りを抑え，平均パケット転送遅延をさらに 10 分の 1 に下げることができている。次式で導出されるチャンネルごとの送信データ量の分散  $\sigma^2$  のノードあたり平均値は，シナリオ 3 では 8,880,000 であったのに対し，シナリオ 4 では 79,300 であった。

$$\sigma^2 = \frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} (\bar{x} - x_c)^2, \quad (3)$$

ここで， $n_c$  はチャンネル数， $x_c$  はチャンネル  $c$  における送信フレーム数， $\bar{x}$  は送信フレーム数の平均である。同様に，次式で導出されるノード  $i$  のリアルタイム通信チャンネルにおける送信デー

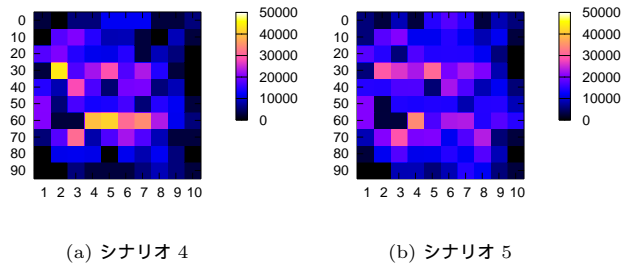


図 8 総送信 MAC フレーム数

Fig. 8 Comparison of total number of transmitted MAC frames.

タ量の Fairness index  $f_i$  についても、すべてのノードの平均値がシナリオ 3 では 0.60 であったのに対し、シナリオ 4 では 0.99 であった。

$$f_i = \frac{\left( \sum_{c=1}^{n_c} x_{i(c)} \right)^2}{n \sum_{c=1}^{n_c} x_{i(c)}^2} \quad (0 \leq f_i \leq 1). \quad (4)$$

ここで、 $n_c$  はリアルタイム通信チャンネル数、 $x_{i(c)}$  はノード  $i$ 、チャンネル  $c$  における送信フレーム数であり、Fairness index が 1 に近いほどチャンネルが均等に使用されていることをあらわす。また、シナリオ 4 における平均パケット転送遅延の最大値は 18 ms であるが、これは ITU-T G.144 で定められる通信品質クラス A (固定電話並み) の要求条件 100 ms を満たしている。

シナリオ 5 で論理ルーティングを行うことのパフォーマンス向上は図 5、6、7 では顕著に認められないが、ノードごとの送受信 MAC フレーム数を表した図 8 より、ノード間での負荷分散が行われていることがわかる。図 8 では、10×10 に配置されたそれぞれのセルがノードに対応し、セルの色が明るいほどノードの総送信 MAC フレーム数が多いことを示す。また、縦軸と横軸の数値の和がそのノードの番号に対応する。シナリオ 4 では、ノード番号 32 と 65 の 2 ノードに負荷が集中していることがわかる。ノードごとの総送信 MAC フレーム数の分散は、シナリオ 4 では 102,480,000、シナリオ 5 では 75,800,000 であり、ノードごとの総送信データ量について求めた Fairness index においても、シナリオ 4 では 0.53 であったのに対し、シナリオ 5 では 0.66 であった。

以上より、我々の提案手法では、複数のリアルタイム通信チャンネルを効率的に使用することによって平均パケット配送率、平均パケット転送遅延および平均遅延ジッタに関する性能向上を達成するとともに、帯域使用状態を考慮した論理ルーティングによってノードの負荷が分散されることが示された。

## 5. おわりに

本稿では、複数の無線ネットワークインタフェースを持つノードからなるアドホックネットワークにおいて、帯域の利用状態にもとづいて、アプリケーションの QoS 要求を考慮した経路制御を行う手法について、シミュレーション評価により、その有効性を示した。今後は、より一般的なトポロジでシミュ

レーション評価を行い、提案手法の有効性を確認し、さらに、ノードの移動などが発生する動的な環境へ適用するための拡張を行う。

## 文 献

- [1] L. Hanzo and R. Tafazolli: “A survey of QoS routing solutions for mobile ad hoc networks”, IEEE Communications Surveys and Tutorials, **9**, 2, pp. 50–70 (2007).
- [2] R. Guimaraes, J. Morillo, L. Cerda, J.-M. Barcelo and J. Garcia: “Quality of service for mobile ad-hoc networks: an overview”, Polytechnic University of Catalonia (2004).
- [3] H. Badis, A. Munaretto, K. A. Agha and G. Pujolle: “QoS for ad hoc networking based on multiple metrics: Bandwidth and delay”, Proceedings of the 5th IFIP-TC6 International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, pp. 15–18 (2003).
- [4] J. Li, C. Blake, D. S. D. Couto, H. I. Lee and R. Morris: “Capacity of ad hoc wireless networks”, Proceedings of 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 61–69 (2001).
- [5] S. H. Shah, K. Chen and K. Nahrstedt: “Available bandwidth estimation in IEEE 802.11-based wireless networks”, Proceedings of 1st ISMA/CAIDA Workshop on Bandwidth Estimation (BEst 2003) (2003).
- [6] P. Kyasanur and N. H. Vaidya: “Routing in multi-channel multi-interface ad hoc wireless networks”, Technical report, University of Illinois at Urbana-Champaign (2004).
- [7] P. Kyasanur and N. H. Vaidya: “Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface ad hoc wireless networks”, Proceedings of ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, Vol. 10, pp. 31–43 (2006).
- [8] A. Raniwala and T. cker Chiueh: “Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network”, Proceedings of 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Vol. 3, pp. 2223–2234 (2005).
- [9] N. Niranjana, S. Pandey and A. Ganz: “Design and evaluation of multichannel multirate wireless networks”, Mobile Networks and Applications, **11**, 5, pp. 697–709 (2006).
- [10] 梶岡, 若宮, 佐藤, 林, 松井, 村田: “マルチインタフェースアドホックネットワークにおけるチャンネル使用状態を考慮した経路制御手法の提案と実装”, 電子情報通信学会 技術研究報告 (AN2007-24), pp. 55–60 (2007).
- [11] T. H. Clausen, C. M. Dearlove and P. Jacquet: “The optimized link state routing protocol version 2 (OLSRv2)”, Mobile Ad hoc Networking (MANET) Internet-Draft (2008).
- [12] K. Xu, K. Tang, R. Bagrodia, M. Gerla and M. Bereschinsky: “Adaptive bandwidth management and QoS provisioning in large scale ad hoc networks”, Proceedings of IEEE Military Communications Conference, Vol. 2, pp. 1018–1023 (2003).
- [13] W. Xiao, B. H. Soong, C. L. Law and Y. L. Guan: “Evaluation of heuristic path selection algorithms for multi-constrained QoS routing”, Proceedings of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Vol. 1, pp. 112–116 (2004).
- [14] S. Licking, W.-P. Chen, M. Moh and M. Nguyen: “A load-balanced channel assignment scheme for wireless mesh networks”, Proceedings of the 18th IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS 2006) (2006).
- [15] Scalable Network Technologies, Inc.: “Creators of QualNet Network Simulator Software”, <http://www.scalable-networks.com/>.
- [16] Information and Communication Network Lab., Niigata University: “nOLSRv2”, <http://www.net.ie.niigata-u.ac.jp/~yowada/v2/>.