

モバイルアドホックネットワークのインターネット接続方式

間瀬 憲一[†] 大和田泰伯[†] 前野 誉[†]

An Internet Connecting Mechanism for Mobile Ad Hoc Networks

Kenichi MASE[†], Yasunori OWADA[†], and Taka MAENO[†]

あらまし モバイルアドホックネットワークにおいてモバイルノード (MN) のいくつかがインターネットと接続し、これらの MN (GW-MN と呼ぶ) を介して他の MN がインターネットと通信するシナリオを考える。提案方式では、GW-MN が直接つながるインターネット内のルータ (アクセスルータ) がインターネットゲートウェイ (IGW) となり、プレフィックスを GW-MN を介して MANET に広告する。MN はこのプレフィックスを用いて気付アドレスを生成する。提案方式は IGW の数を最小化する仕組みを備えており、GAP (Gateway Aggregation Protocol) と呼ぶ。GW-MN を変更してもいったん獲得した気付アドレスを継続利用できる。この結果、アプリケーションへの影響は原理的に生じないため、任意のタイミングでの GW-MN の変更が可能になる。また、MANET 内でのオーバーヘッドも比較的少ない方式である。本論文では、本プロトコルの詳細、他方式との定性的比較、シミュレーションによる性能評価について述べ、本方式の優位性を示す。

キーワード アドホックネットワーク, マルチホップ, インターネット, マルチゲートウェイ

1. ま え が き

インターネットの発展, コンピュータや無線 LAN 機器の小型, 軽量化を背景に移動端末 (Mobile Node : MN) のみでネットワークを構成可能なモバイルアドホックネットワーク (Mobile Ad Hoc Network : MANET) の研究開発, 標準化が進展している。この MANET に関しては, 単独利用の他ブロードバンドアクセスやユビキタスネットワークの足回りのネットワークなど, インターネットと接続して利用される形態も関心を集めている。この場合, MN がどのようにグローバルアドレスを獲得し, インターネットと通信するかが課題である。IETF では 2005 年 11 月に Ad-Hoc Network Autoconfiguration (autoconf) というワーキンググループが設立され標準化の検討が開始している。

MANET のインターネット接続においては, MN (またはその一部) は MANET 用の無線インタフェースに加えて, インターネット内の固定のアクセスルータ (Access Router : AR) への有線/無線インタフェー

スを有し, インターネットに接続してインターネットゲートウェイ (Internet gateway : IGW) として機能する。なお, AR そのものが, MANET 用のインタフェースをもつ場合も考えられる。各 IGW は自身の IGW 情報 (IP アドレス, プレフィックスなど) を周期的, あるいは MN からの要求に基づいて MANET 内に送信する。これを IGW 広告と呼ぶ。IGW 広告はフラッディングプロトコルなどを利用して, マルチホップ通信により MANET 全体にブロードキャストされる。各 MN は受信した IGW 広告に基づいて IGW を選択し, その IGW のプレフィックスに基づいて, 自身のグローバルアドレス (気付アドレス) を生成する。これによって, この MN はインターネット側のノード (インターネットノード) と通信可能になる。

複数の IGW をもつ MANET においては, MN が IGW の一つを選択し, そのプレフィックスを用いて気付アドレスを生成する。これによって, インターネットノードから MN へのパケットは選択した IGW 経由で MN へ配送される。ネットワーク管理上, MN からインターネットへ向かうパケットも選択した IGW を通過することが望ましい。そのための方法として, ルーティングヘッダを用いる方式 [1], プレフィックス連続法が提案されている [2]。また, IGW 切替に伴う気付ア

[†] 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市
Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 2-8050 Ikarashi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

ドレスの変更が生ずると、MANET 内で経路再構築が必要になる。この時間を最小化するため、常に複数気付アドレスを広告する方式 [3]、MANET ローカルアドレスで経路を構築し、IGW との通信はトンネルを用いる方式が提案されている [4]。これらの方式では、複数アドレスの広告、トンネリングに伴うオーバーヘッドが生ずる。また、IGW 切替に伴う気付アドレスの変更を避けることはできず、アプリケーションの中断などの影響が考えられる。本論文では、インターネットへの出入り口となる MN (従来方式における IGW) を変更してもいったん獲得した気付アドレスを継続利用できる方式を提案する。この結果、アプリケーションへの影響は原理的に生じない。また、MANET 内でのオーバーヘッドも比較的少ない方式である。本論文では、文献 [5] の提案を発展させ、本プロトコルの基本的メカニズム、他方式との定性的、定量的比較、シミュレーションによる性能評価について述べ、本方式の優位性を示す。

2. 関連研究

MN が IGW を選択し、その IGW を利用し続ける場合、気付アドレスの変更は生じない。しかし、MN がその IGW から離れた場所に移動し、別の IGW が近くにあったとしても、元の IGW の利用を続けるため、MANET 内でのホップ数が増し、無駄なトラヒックを発生させることになり、通信品質の劣化も生ずる。もし、ホップ数が少なく済む近くの IGW へ切替を行えば、MANET 負荷の軽減、通信品質・通信継続性の向上が期待できる。そこで、以下ではインターネット接続を行う MN は常にホップ数が最小の IGW を選択し、移動中も常に現行の IGW よりホップ数がより少ない IGW が見つければ、その時点でその IGW へ切替を行うことを前提とする。なお、ホップ数以外のメトリックも考えられるが、本論文ではその問題は対象外とする。このとき、新たな IGW が広告するプレフィックスを用いて気付アドレスを新たに生成する。このため、このノードに関係する経路が MANET 内に再構築されるまで、一定の時間を要し、その間、パケット転送の中断が起こることになる。

この問題を避ける方法として、文献 [3] では MN が複数 IGW から受信するプレフィックスに基づき、複数の気付アドレスを生成し、そのアドレスを常時 MANET 内に広告する方法が提案されている (複数アドレス広告方式: Multiple Address Advertisement)。このた

め各 MN は複数のアドレスに関する経路を常時構築しておくことが可能で、MN が別のアドレスに切り換えても MANET 内でそのアドレスに関する経路は既に存在していることになる。このため IGW 切替が生じても経路再構築の必要はない。その代償として IGW の個数を n とすれば制御メッセージに含まれるアドレスの数も n 倍必要になる。

文献 [4] では MN は MANET 内のみで有効なアドレス (MANET ローカルアドレス) に基づいて経路構築を行う (ローカルアドレス利用方式: Local Address Tunneling)。MN がインターネットノードへパケットを送信する場合、そのパケットを内部パケットとして外部パケットにカプセル化し、外部パケットの始点を自身の MANET ローカルアドレス、終点を選択している IGW の MANET ローカルアドレスに設定して送信する。このパケットを受信した IGW は内部パケットを取り出し、インターネットノードに送信する。逆にインターネットノードから MANET 内 MN へのパケットを受信した IGW はそのパケットを内部パケットとして外部パケットにカプセル化し、外部パケットの始点を自身の MANET ローカルアドレス、終点を MN の MANET ローカルアドレスに設定して送信する。これを受信した MN は内部パケットを取り出し、通常のパケット受信の処理につなげる。このように、本方式では MANET 内のパケット配送では常に MANET ローカルアドレスが利用されるため、IGW 切替が生じても経路再構築の必要はない。その代償として、MN、IGW ではカプセル化、カプセル分離の処理が発生し、カプセル化により MANET 内を配送されるパケットのサイズが大きくなることにより、貴重な無線帯域がそれだけ消費されることになる。なお、両方式とも気付アドレスの変更そのものは避けられないので、IGW 切替に伴うアプリケーションへの影響を免れるものではない。

3. 提案方式

従来手法では、MANET とインターネットの境界点に位置する MN (AR と接続中の MN) が IGW としてプレフィックスを含む IGW 広告を行うのが基本になっている。このため、複数の MN が AR と接続する場合には、複数の IGW が生じ、それぞれが IGW として異なるプレフィックスを広告する (図 1)。提案手法はこの点で従来手法と大きく異なっている。第 1 に提案手法では、IGW になるのは MN ではなく AR

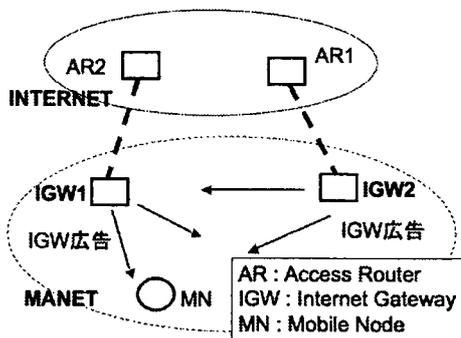


図1 MANETのインターネット接続概念図
Fig. 1 An overview of MANET Internet access.

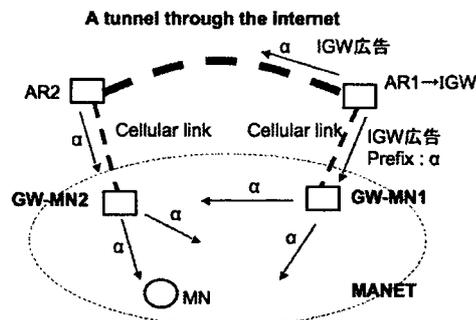


図2 GAPメカニズムの概念図
Fig. 2 A conceptual view of GAP mechanism.

であり、AR自身がIGW広告を発信する。そこで、ARと接続するMN（従来方式ではIGW）を提案方式ではゲートウェイMN（GW-MN）と呼ぶことにする。第2にMNは他のIGWからのIGW広告をモニタしており、新たにARと接続してGW-MNとなると、IGW広告の情報を自身が接続するARに転送する。それを受信したARはそれ自身IGWにはならない。その代わりに受信したIGW広告に含まれる既存IGWのアドレスを知り、既存IGWとの間にインターネット内でトンネルを生成する。トンネル生成にはIP-IPカプセル化を適用可能である[6]。この結果、既存IGWが送信するIGW広告がトンネル経由で直接、ARに届くようになる。ARはこのIGW広告を自身に接続するGW-MN経由でMANETへブロードキャストする。この際、GW-MNは自身のアドレスをこのIGW広告に含める。このため、複数GW-MNがそれぞれ異なるARに接続したとしても最初にGW-MNと接続したARがIGWになりその後IGWが増えることはない。このため提案方式をGW集約方式（Gateway Aggregation Protocol : GAP）と呼ぶ。

GAPでは一つのMANETにおいて複数のMNがインターネットに接続してもIGWは原則一つである。同じプレフィックスをもつIGW広告がIGWとトンネルをもつ複数のARとそれらに接続するGW-MNを経由して、MANETに広告される。ARとの接続をもたないMNは受信したIGW広告に基づき、ホップ数などのメトリックが最小となるGW-MNを選択し、気付アドレスを生成する。どのGW-MNからのGW広告も原則同じプレフィックスを広告するので、MNがMANET内を移動し、GW-MNを変更しても気付アドレスの変更は生じない。

MNはインターネットノード向けの packets について、終点アドレスをルーチングヘッダへ入れ、IPヘッダの終点には選択したMN-GWのアドレスを入れて送出する。GW-MNは受信した packets を接続中のARへ転送する。ARはこれをIGWへ転送する。同時にその packets の始点アドレスを終点、次ホップを packets の転送元GW-MNとするテーブル（次ホップGW-MNテーブル）を作成・維持する。IGWはARから転送された packets をインターネットへ転送する。同時にその packets の始点アドレスを終点、次ホップを packets の転送元ARとするテーブル（次ホップARテーブル）を作成・維持する。IGWがインターネットからMANET内MNあての packets を受信すると、保持している次ホップARテーブルと次ホップGW-MNテーブルを参照して、 packets の転送先（他ARまたは自身に接続中のGW-MNのいずれか）を決める。その packets を受信したARはGW-MNテーブルを参照して packets の転送先（GW-MNのいずれか）を決める。このようにして、インターネットから到着したMANET内MNへの packets はそのMNが選択したGW-MN経由で配送されることになる。

図2に本方式の概念図を示す。図2ではAR1が既存IGWであり、GW-MN1を介してプレフィックスαを含むIGW広告をMANETに送っている。その後、AR2がGW-MN2と接続し、GW-MN1経由のIGW広告をGW-MN2から受信し、IGWにトンネルを生成している。その結果、IGWからのIGW広告がAR2、GW-MN2を介してMANETにブロードキャストされることになる。MANET内のMNはGW-MN1とGW-MN2の双方から同じプレフィックスαを含むIGW広告を受けるので、ホップ数などのメトリックに基づきどちらかのGW-MNを選択し、

IGW 広告が指定するプレフィックスを用いて気付アドレスを生成する。その後、インターネットノードと送受するパケットは MN が選択した GW-MN 経路で転送される。

GAP では例外的ではあるが、複数の IGW が生ずる可能性もある。例えば、複数の MN がほぼ同時に異なる AR に接続した場合である。この場合には、MN と接続した AR はそれぞれ既存 IGW が存在しないと判断し、自身が IGW となる。また、それぞれ IGW を有する二つの MANET がマージした場合も複数の IGW が生ずる。これらの場合には複数の IGW から異なったプレフィックスが MANET に広告される。このとき、IGW 間にトンネルを生成することにより、各 IGW は自身の IGW 広告に加えて他 IGW からトンネル経路で受信する IGW 広告を MANET にブロードキャストするものとする。これにより、一つの IGW が送出する IGW 広告はすべての GW-MN から MANET にブロードキャストされる。MN はどの IGW からプレフィックスをもらって気付アドレスを生成してもよく、その後、GW-MN を変更したとしても気付アドレスを変更する必要は生じない。いったん、IGW となった AR は接続する GW-MN をすべて失った時点で IGW の役割も終了する。

提案プロトコルは MANET に分割が生じた場合にも、問題なく動作する。例えば、二つに分割後の MANET をそれぞれ MANET1, MANET2, それぞれのアクセスルータを AR1, AR2 とする。分割前には AR1 が IGW であったとすると、分割後には AR2 は AR1 からの IGW 情報を自身に接続する GW-MN から得られなくなるので分割を検知することができ、その時点で自身が IGW になる。AR1 と AR2 間のトンネルもタイムアウトにより消滅する。

4. 提案方式の特徴

4.1 評価対象と評価指針・条件

提案方式の特徴を明らかにするため、従来方式と定性的、定量的な比較検討を行う。(1)~(4)の従来方式では、GW-MN 自身が IGW になる。

- (1) 単純 IGW 切替方式 (Simple Switching)
- (2) 単一 IGW 継続利用方式 (No Switching)
- (3) 複数アドレス広告方式 (Multiple Address Advertisement)
- (4) ローカルアドレス利用方式 (Local Address Tunneling)

(5) GW 集約方式 (GAP)

(1) の単純 IGW 切替方式は最も簡単な方式であり、IGW 切替時に新たな気付アドレスを獲得し、そのアドレスの利用を新たに開始する方式である。(2) の単一 IGW 継続利用方式は MN の移動にかかわらず、最初に選択した IGW を使い続ける方式である。ただし、その IGW とのパスを確立できなくなった場合には新たに IGW を選択する。(3), (4) は 2. に述べた方式、(5) は提案方式である。

各方式は異なったメカニズムに基づいており、AR と MN の機能分担も異なるため、評価条件をそろえ、すべての要因を取り込んで総合評価することは容易ではない。MN はモバイル端末であるため、処理能力や使用できるメモリ量は比較的少ない。MANET が使用する無線帯域も MANET の共用リソースであるため、ボトルネックが生じやすい。これに対して、MN と AR 間のアクセス回線とインターネット側は MANET 側に比べてリソース使用面の制約は少ないと考えられる。そこで以下では MANET に着目して方式評価を行う。まず各方式について、方式選定上主要な項目について定性的な評価を行う。次に方式実現のためのメモリ量、処理量の定量的評価を行う。5. では MANET のパケット配信性能にかかわる項目に関してシミュレーションにより定量的な評価を行う。

4.2 定性的評価

はじめに各方式を定性的に比較した結果を表 1 にまとめる。MN 移動により IGW を変更すると、単純 IGW 切替方式、複数アドレス広告方式、ローカルアドレス方式ではアドレス変更となるので、アドレス保持ができず、アプリケーションへの影響が生ずる可能性がある。単純 IGW 切替方式では、アドレス変更時に経路表の再構築までの間、経路が利用できなくなる中断時間が生ずる。単一 IGW 継続利用方式では、MN が移動しても IGW を変更しないので、IGW までの平均ホップ数の増大により、MANET 内の負荷が増大する。また、いったん選択した IGW へのパスが失われる場合には結果として、IGW 切替となり、アドレス変更と経路確立の中断時間が生ずる。複数アドレス広告方式では、経路制御メッセージに複数アドレスを含めること、ローカルアドレス方式では IGW 経路のパケットを外部パケットにカプセル化することにより多少のオーバーヘッドが生じる。GAP においてもインターネットノードへのパケットにルーティングヘッダをつけるため多少のオーバーヘッドが生ずると考えられ

表 1 複数 GW をもつ MANET のインターネット接続方式の比較
 Table 1 Internet access of a MANET with multiple gateways.

	Address Keeping	Route Availability	Number of Hops	Overhead in the MANET
Simple Switching	<i>No</i>	<i>Low</i>	Small	Low
No Switching	Not always yes	<i>Medium</i>	<i>Large</i>	Low
Multiple Address Advertisement	<i>No</i>	High	Small	<i>Slightly High</i>
Local Address Tunneling	<i>No</i>	High	Small	<i>Slightly High</i>
GAP	Yes	High	Small	Medium

る。表 1 の評価において弱点と考えられる部分を太字斜体で示している。表 1 の範囲外であるが、GAP では、GW-MN と AR 間のアクセス回線、及び AR と IGW 間のトンネルに制御オーバーヘッドが生ずる。しかし、MANET 外の帯域リソースは MANET 内に比べて格段に潤沢であることが期待される。したがってこのオーバーヘッドは大きな弱点とはならないであろう。言い換えれば、GAP は MANET 内のオーバーヘッドを極力外部ネットワークへ転嫁することをねらうものであり、本質的な弱点を有しない優れた方式であるといえる。

4.3 メモリ量、処理量の評価

単純 IGW 切替方式と単一 IGW 継続利用方式は表 1 に示されたように、経路利用度小、ホップ数大などパケット配信性能に問題がある。この点は 5. で定量的に示す。そこで、ここでは 4.2 で比較した 5 方式の中からこの 2 方式を除き、残りの 3 方式についてメモリ量、処理量の検討を行う。複数アドレス広告方式とローカルアドレス利用方式では AR へのアクセス回線をもつ MN が IGW となる。GAP ではこれらの MN は GW-MN となり、IGW となっている AR との仲介役として、IGW 広告の転送などを行う。したがって MN-GW は IGW のプロキシ的な役割を行うものであり、機能的には IGW と同等、関連するメッセージの転送頻度も同等である。よって、IGW 機能と GW-MN 機能に関してメモリ量と処理量も同等と考えられる。また、これらの機能に比べて、ルーチング機能、パケット転送機能はより複雑あるいはパケットごとの処理を要するため、メモリ量、処理量も大きくなる。そこで、以下ではルーチング機能とパケット転送機能に着目して、メモリ量、処理量を検討する。

MANET においてメモリ量と処理量がノード数 (MN と IGW/GW-MN の総数) とどのように関係するかを推定するため、OLSRv2 の仕様に基づくルーチングソフトウェアを実装し [7], [8], 新潟大学構内に設置された 50 ノードのアドホックネットワークベッド

において動作させ、メモリ量と処理量を実測した。この結果から、ノード数を x とし次式が得られた。

$$\text{メモリ量} = 4.2x + 800 \text{ (kByte)} \quad (1)$$

$$\text{処理量} = 0.84x \quad (2)$$

ここで、処理量の単位はテストベッドで用いている小型コンピュータの CPU 使用率 (%) であり、5 秒間隔、50 回測定の前平均値として求め、ノード数 0 の場合の処理量は 0 と仮定し近似式を求めた。したがって、得られた係数の値は使用したコンピュータに依存するが処理量を比較する場合の相対値として意味がある。複数アドレス広告方式では一つのノードが複数のアドレスをもち、それらを MANET 内に広告する。このため、ノード数を x 、各ノードが n 個のアドレスをもつとすると、式 (1), (2) において x の代わりに $x \times n$ の値を用いることで、メモリ量、処理量を推定できると考えられる。

次に、VoIP フローを加えた場合、データパケットの転送処理 (発着 MN における処理も含む) が生じる。この処理量は、VoIP1 フロー相当のデータを転送させたときの CPU 使用率を a 、無負荷時の CPU 使用率 b を実測し、 $a - b$ により求めた。これより、VoIP1 フロー当りの処理量は 11% となることが分かった。ローカルアドレス方式においてはトンネリングを行うためパケットの始点ではパケットのカプセル化、終点ではカプセル分離が必要になり、パケットごとの転送処理量が増大する。PPPoE を用いた実験結果より、トンネリングに要するメモリ量は 550 kByte 程度、処理量は VoIP フロー当り 11% と推定した。一方 GAP ではパケット転送処理に関しては、インターネット向けのパケットについてのみルーチングヘッダを加える処理が生ずる。この機能は IPv6 の仕様に含まれており、カーネル内でパケット転送処理として実装されているため、動作も高速で、PPPoE などのようにユーザ空間のメモリを消費しない。このため処理量は、パケッ

表 2 メモリ量, 処理量の比較

Table 2 Comparison of memory usage and processing load.

	Memory usage		processing load	
	MN	GW	MN	GW
Local address Tunneling	2.2 MByte	2.2 MByte	1	2
Multiple address Advertisement	9.3 MByte	9.3 MByte	8.8	9.4
GAP	1.6 MByte	1.6 MByte	1	1.1

ト転送の処理量に含まれる程度と推定される。

以上の前提に基づき, MN 数を 200, そのうちの GW (GAP では MN-GW, その他では IGW) 数を 10, すべての VoIP フローはインターネットノードとの通信で, IGW/GW-MN 当りの平均同時 VoIP フロー数を 10, MN 当りの平均同時 VoIP フロー数を 2 との仮定に基づいて, メモリ量, 処理量を試算した結果を表 2 に示す. ここで, 処理量は GAP の MN の処理量を 1 とし, 相対値で示している. メモリ量, 処理量の観点から, 複数アドレス方式は最も不利であり, ローカルアドレス方式と GAP には大きな違いがないものの, GAP が若干有利な結果となる。

5. シミュレーションによる性能評価

5.1 シミュレーションモデル

(1) シナリオと評価対象

建設現場など, 多くの作業車, 工事車両が MN として動きまわるエリアを想定する. 800 m × 300 m の長方形のエリアに 50 台の MN が存在し, そのうちの n 台の MN が MANET インタフェースに加えて AR への移動通信無線インタフェースをもち, 常時 AR への接続が可能であるものとする. この n 台が従来方式では IGW, GAP では GW-MN となる. 以下では, これらをまとめて単にゲートウェイ (GW) と呼ぶ. 各 MN はランダムウェイポイントモデル [9] に従う. MANET の外部は GW-MN と AR 間のアクセス回線を含めて十分な帯域リソースを有するものと仮定し, 以下の評価では MANET 内のリソースと負荷のみに着目する。

(2) 通信モデルとプロトコル

電波伝搬モデルとしては 2 波反射モデル, 物理・リンク層の通信プロトコルとしては IEEE802.11 [10] 無線 LAN (アドホックモード) を想定する. ネットワーク (IP) 層は IETF でスタンダードトラックの RFC に向けて標準化途上にあるプロアクティブ型の

表 3 シミュレーション条件

Table 3 Simulation parameters.

シミュレータ	QualNet 3.9
シミュレーション時間	900 [s]
シミュレーションエリア	800 [m] × 300 [m]
端末数	50
通信半径	100 [m]
移動モデル	Random Way Point
移動速度, pause time	0~3 [m/s], 0 [s]
MAC プロトコル	802.11-abstract
帯域幅	11 Mbit/s
物理モデル	2 波モデル
アプリケーション	CBR 50 [packet/s]
パケットサイズ	172 [Byte]
シミュレーション回数	10 回平均

表 4 OLSRv2 のパラメータ

Table 4 OLSRv2 parameters.

Hello Interval	2 [s]
TC Interval	5 [s]
Neighbor Hold Time	6 [s]
Topology Hold Time	15 [s]

ルーチングプロトコル OLSRv2 とその実装を利用する [7], [8]. このプロトコルには IGW 広告の機能, 複数アドレス広告機能が備わっている. アプリケーションとしては VoIP を想定し, RTP/UDP プロトコルの上で動作する. すべての通信はインターネットノードとの通信とし, 与えられた VoIP フロー数 m に対して, GW (GAP では MN-GW, 他方式では IGW) 以外からランダムに選択された m 個の MN が通信を行うものとする. これらのシミュレーション条件をまとめて表 3, 表 4 に示す. 表 3 に示したシミュレーション条件は MANET のネットワークレベルの性能評価を行うのに必要な物理層, MAC 層, ネットワーク層の基本的な特性とノードの移動モデルを含んでおり, 多くの MANET 性能評価で用いられる典型的な条件をベースとしている [9]. 煩雑さを避けるため, 以降の性能比較の図中には示していないが 95%信頼区間を求め, シミュレーションの精度を確認している. 1 例として, GW 数 $n = 2$, VoIP フロー数 $m = 3$ の場合, 単純 IGW 切替方式, GAP の平均パケット配信率に関する信頼区間はそれぞれ, 81.1~90.9, 92.2~97.6%となり, 5.2 の図 3 における性能比較の妥当性を確認できる。

シミュレーションツールとして QualNet を利用した [11]. ルーチングプロトコル, MAC プロトコルの詳細なパラメータはデフォルト値を用いる。

(3) IGW/GW-MN 選択メトリック

簡単のため、MN からのホップ数が最小の IGW/GW-MN を選択するものとする。同じ場合にはランダムに選択する。また、単一 IGW 継続利用方式を除いて、通信中によりホップ数の少ない IGW/GW-MN が検出された場合には直ちに切り換を行うものとする。

5.2 シミュレーション結果と分析

GW 数 n を 2 に設定したシミュレーション結果を図 3 から図 5 に示す。横軸をフロー数とし、縦軸はそれぞれ平均パケット配信率（以下では配信率）、平均パケット配信遅延時間（以下では遅延時間）、平均ホップ数（以下ではホップ数）である。フロー数 3 のとき、複数アドレス広告方式、ローカルアドレス利用方式、GAP の 3 方式（以下では単に 3 方式と呼ぶ）はほぼ同等の配信率であり、単一 IGW 継続利用方式、単純 IGW 切り換方式より高い配信率を示す。単純 IGW 切り換方式では IGW 変更に伴い、経路の再構築が必要になるため、パケット配信率は 3 方式より低下する。フロー数が増えるのとどの方式でも配信率が徐々に低下する。3 方式と単純 IGW 切り換方式ではほぼ一定の割合で低下する。単一 IGW 継続利用方式では、図 5 が示すようにホップ数が増大するため、無線帯域の負荷が増大する。この影響はフロー数が多くなるにつれて大きくなり、遅延の増大（図 4）と大きな割合での配信率の低下を招くと考えられる（図 3）。なお、図 4 で単純 IGW 切り換方式の遅延は 3 方式より低い、これは図 5 のようにホップ数も少ないことによる。単純 IGW 切り換方式では経路構築の間、パケットを廃棄する。また、ホップ数が比較的多い場合に IGW 切り換が生ずる可能性が高い。他の方式ではそのような場合もパケット配信を継続するが、単純 IGW 切り換方式ではそれらのパケットを廃棄するため、相対的にホップ数が少なくなると考えられる。

図 6 にフロー数 3、GW 数 2 の場合のパケットの損失内訳を示す。損失原因として、経路なし、MAC キュー・オーバフロー、MAC タイムアウト（最大再送回数の再送を行っても ACK タイムアウトにより転送失敗）がある。3 方式の特性はほぼ同じである。単純 IGW 切り換方式ではパケット損の主要因は経路なしである。単一 IGW 継続利用方式では経路なしとオーバフローが主要因である。これは上述の分析結果と整合している。

VoIP 数 m を 3 に設定したシミュレーション結果を図 7 から図 9 に示す。横軸を GW 数（GAP では

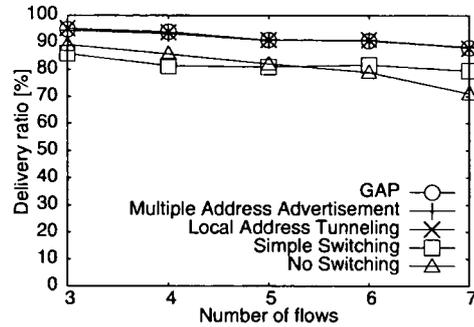


図 3 CBR フロー数と配信率

Fig. 3 The relationship between number of CBR flows and average packet delivery ratio.

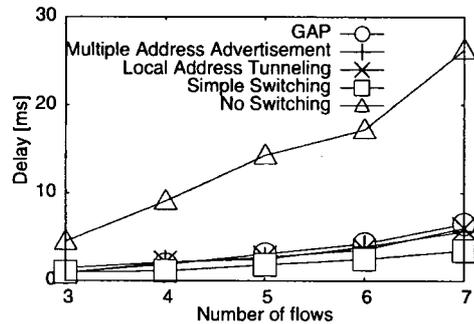


図 4 CBR フロー数と遅延時間

Fig. 4 The relationship between number of CBR flows and average delay.

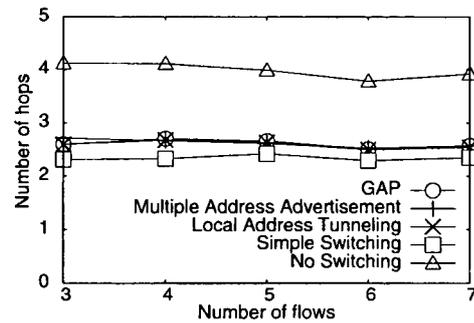


図 5 CBR フロー数と平均ホップ数

Fig. 5 The relationship between number of CBR flows and average hop count.

GW-MN、他の方式では IGW) とし、縦軸はそれぞれ配信率、遅延時間、ホップ数である。図 9 に示すように単一 IGW 継続利用方式では GW 数が変化してもホップ数はほぼ一定であるが、他の方式では GW が増えるにつれて、ホップ数が減少する。このため、配信率増加（図 7）、遅延時間減少（図 8）の傾向となる。

ここまでの評価では、複数アドレス広告方式、ロー

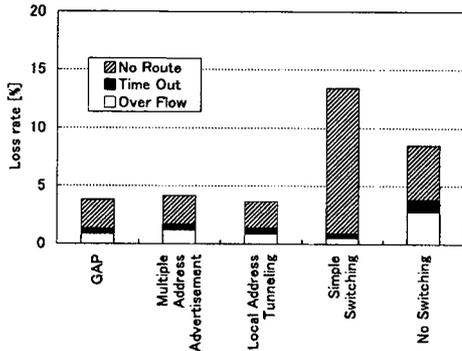


図 6 パケット損の内訳
Fig. 6 The detail of the packet loss.

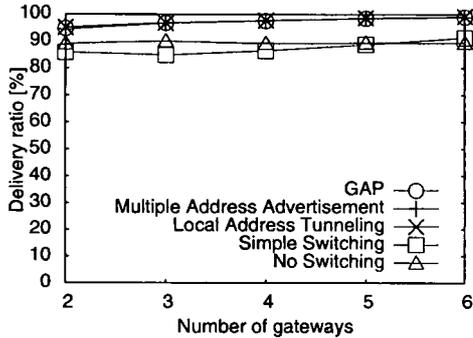


図 7 ゲートウェイ数と配信率
Fig. 7 The relationship between number of gateways and average packet delivery ratio.

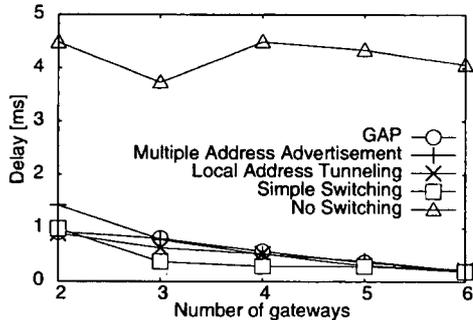


図 8 ゲートウェイ数と遅延時間
Fig. 8 The relationship between number of gateways and average delay.

カルアドレス利用方式は GAP に比べて多少のオーバーヘッドを伴うが、無線帯域利用の観点からは大きな問題にはならないことが分かる。しかし、これらの方式ではアドレス変更を避けられないため、アドレス変更時にはアプリケーションが中断し、ユーザが再接続するなどの対応が必要になる。そこで、アドレス変更時

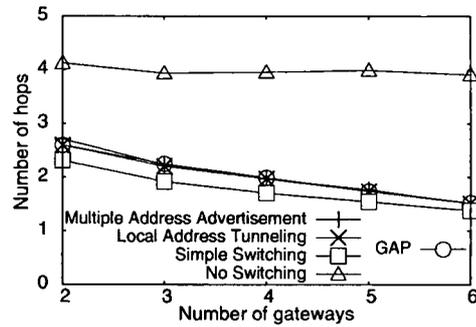


図 9 ゲートウェイ数と平均ホップ数
Fig. 9 The relationship between number of gateways and average hop count.

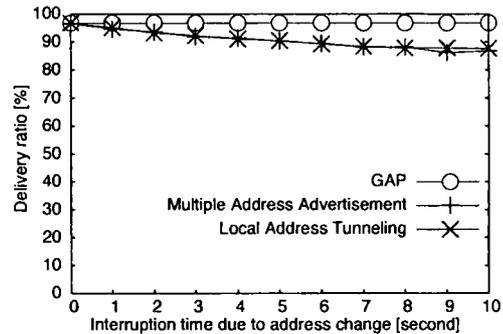


図 10 アドレス変更による中断時間の影響
Fig. 10 Effect of interruption time due to address change.

には一定の中断時間が生じ、この間、パケットが破棄されると仮定し、中断時間をパラメータにとって、配信率を求めた結果を図 10 に示す。ここで、GW 数 n を 3、VoIP フロー数 m を 3 としている。この図に示されるように、アドレス変更による中断時間が長くなるほど、複数アドレス広告方式、ローカルアドレス利用方式では配信率が低下することが分かる。一方 GAP ではアドレスの継続利用が保証されるため、このような問題が生じないことが大きな利点である。更に、4. に述べた定性的評価、メモリ量、処理量に関する定量的評価を含めた総合的評価として、GAP の優位性が示されている。

6. むすび

MN (モバイルノード) の集まりである MANET においていくつかの MN がインターネット内のアクセスルータ (AR) と接続し、他の MN とインターネットとの通信をゲートウェイ (GW-MN) としてサポー

トするインターネット接続方式を提案した。本方式では、MNがグローバルアドレス(気付アドレス)を生成するために必要なプレフィックスの広告は原則ARの一つ(IGW)が担当する。このため、本方式をゲートウェイ集約方式(GAP)と呼ぶ。GAPの大きな特徴はMNがいったん気付アドレスを獲得すると、その後、インターネットとの通信に他のGW-MN選択しても気付アドレスの変更が生じないことである。このため、通信中のアプリケーションに影響を与えない。

本論文では、他の4種類のインターネット接続方式と比較し、総合的・定性的な評価、メモリ量、処理量に関する定量的な評価を行った。更に簡単なシミュレーションにより、平均パケット配信率、平均パケット配信遅延時間、平均ホップ数の定量的な評価を行った。この結果、提案方式の総合的な優位性を示した。今回のシミュレーションでは基本的な性能評価の観点からノード数は固定であり、GW-MNとなるノードの追加、変更なども考慮せず、MANET内の無線帯域利用に絞って検討している。GAPでは、IGWとAR間でのトンネル確立などに若干の遅延が生ずる可能性がある。この遅延は数百ms以下であれば実用上問題にならないと考えているが、今後の検討課題である。その他、各種設計パラメータの選定方法、効率的な実装方法、プロトコル動作の安定性検証などの課題がある。また、提案方式に基づくIETF autoconfにおける標準化検討への寄与も期待される。

文 献

- [1] R. Wakikawa, J.T. Malien, C.E. Perkins, A. Nilsson, and A.J. Tuomien, "Global connectivity for IPv6 mobile ad hoc networks," draft-wakikawa-manet-globalv6-05 (work in progress), March 2006.
- [2] C. Jelger, T. Noel, and A. Fre, "Gateway and address autoconfiguration for IPv6 ad hoc networks," draft-jelger-manet-gateway-autoconf-v6-02 (work in progress,), April 2004.
- [3] S. Ruffino and P. Stupar, "Automatic configuration of IPv6 addresses for nodes in a MANET with multiple gateways," draft-ruffino-manet-autoconf-multigw-01 (work in progress), Dec. 2005.
- [4] P. Hofmann, "Multihop radio access network (MRAN) protocol specification," draft-hofmann-autoconf-mran-00 (work in progress), March 2006.
- [5] K. Mase and Y. Owada, "Gateway aggregation protocol (GAP) for mobile ad hoc networks," draft-mase-autoconf-gap-00 (work in progress), May 2006.
- [6] A. Conta and S. Deering, "Generic packet tunneling in IPv6 specification," RFC 2473, Dec. 1998.
- [7] T. Clausen, C. Dearlove, and P. Jacquet, "The op-

timized link-state routing protocol version 2," draft-ietf-manet-olsrv2-02 (work in progress), June 2006.

- [8] 大和田泰伯, 山口圭太, 土田健太, 村上裕一, 間瀬憲一, "OLSRv2の実装と動作検証," 2006 信学総大, B-21-21, March 2006.
- [9] J. Broch, D.A. Maltz, D.B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva, "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols," Proc. IEEE/ACM MOBICOM'98, pp.85-97, 1998.
- [10] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," IEEE Std. 802.11-1997, 1997.
- [11] <http://www.scalable-network.com/>

(平成 18 年 8 月 4 日受付, 11 月 4 日再受付)



間瀬 憲一 (正員:フェロー)

昭 45 早大・理工・電気通信卒。昭 47 同大大学院修士課程了。同年電電公社武蔵野電気通信研究所入所。以来、通信網構成法、ダイナミックルーティング、ネットワーク設計法、通信品質、コンピュータネットワーク、モバイルアドホックネットワーク、無線メッシュネットワークの研究に従事。昭 53~54 米国コロンビア大客員研究員。平 11~15 新潟大学工学部情報工学科教授。平 16 より新潟大学大学院自然科学研究科教授、国際情報通信教育研究センター長。工博。平 5 年度本会論文賞受賞。平 9 年度第 13 回電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。著書「マルチメディアネットワークとコミュニケーション品質」、「無線 LAN とユビキタスネットワーク」など。



大和田泰伯 (学生員)

平 14 新潟大・工・福祉人間卒。平 16 同大大学院修士課程了。同年、同大学院自然科学研究科入学。現在、在学中。平 15 第 65 回本会学術奨励賞受賞。平 15VTC2003-spring Student Encourage Award 受賞。平 17 VTC2005-fall Student Paper Award 受賞。



前野 誉 (学生員)

平 18 新潟大・工・情報卒。同年、同大大学院自然科学研究科入学。現在、在学中。