

アドホックネットワークにおける階層型複数経路構築手法の提案と評価

油田 健太郎¹ ・ 高辻 慎吾² ・ 岡崎 直宣³

Proposal and its evaluations of hierarchical multiple-route routing protocol for ad hoc network

Kentaro ABURADA¹, Shingo TAKATSUJI², Naonobu OKAZAKI³

Abstract

A global positioning system (GPS)-based routing protocol, called Zone-based Hierarchical Link State (ZHLS) routing protocol, have been proposed for routing data packets for ad hoc networks. In this protocol, the network is divided into non-overlapping zones. Each node only knows the node connectivity within its zone and the zone connectivity of the whole network. The link state routing is performed on two levels: local node and global zone levels. Hierarchical approach reduces the amount of overhead of dynamic changing topology. ZHLS is, however, single-path protocol which detects only one route. In ad hoc networks, due to mobility of nodes and instability of communication links, multi-path protocols are required. In this paper, I propose a Multiple-Route Zone-based Hierarchical Source Routing (called MR-ZHSR) which generates disjoint paths in global zone level. If a disconnected link is detected in the currently used route, packet transmission can be switched to another route without delay.

Key Words:

Mobile networks, Ad hoc networks, Routing protocol

1. はじめに

近年、モバイル端末および無線通信環境の発展・普及により、アドホックネットワークが注目されている。アドホックネットワークは、既存のインフラを必要とせず端末同士が直接無線通信を行うため、柔軟かつ容易にネットワークを構築することができる。また、端末同士が通信圏内に存在せず、直接通信できない場合は、他の端末が中継することによってマルチホップ通信が可能である。このようなアドホックネットワークの特徴を利用した適用例として、災害時やイベント会場などの既存のインフラが使用

できない場所でのネットワーク構築が挙げられる。

端末がマルチホップ通信を行う場合、各端末は経路情報を獲得するためルーティングを行う。アドホックネットワークでは様々なルーティングプロトコルが提案されているが、それらのプロトコルは大きく分けて **Proactive** 型と **Reactive** 型の2つに分類される。**Proactive** 型では各端末が定期的に経路情報を交換することでネットワーク全体のトポロジを把握しデータを送信する。このプロトコルでは、あらかじめ経路が構築されるため、すぐに送信を開始することが可能だが、経路情報の維持に定期的な情報交換を必要とするため、経路制御情報量が大きくなる。一方、**Reactive** 型では、データ転送のための経路が必要となった場合のみ経路を構築する[1][2]。このプロトコルでは、定期的な経路情報の交換を必要

¹ 情報工学専攻大学院生

² 情報システム工学科学部生

³ 情報システム工学科助教授

としないため、経路制御情報は小さくなるが、通信を開始する際に経路を構築するため通信開始までに時間がかかってしまう。そこで、Proactive 型と Reactive 型の長所を併せ持つ Hybrid 型が提案されている^[3-6]。Hybrid 型では、限定された範囲で経路情報の交換を行い、それ以外の範囲では送信時に経路探索を行う。そのため、経路制御量を減少させることができる。

従来、Hybrid 型のプロトコルとして ZHLS (Zone-based Hierarchical Link State) ルーティングが提案されている^[4]。

アドホックネットワークでは、端末の移動やバッテリー切れなどにより通信リンクが頻繁に切断される。このため、単一の経路しか構築されないルーティングでは、経路上のリンクが切断された場合、経路再構築に時間がかかるという課題がある。しかしながら、ZHLS ルーティングでは単一の経路しか構築されない。この課題を改善した手法として MR-ZHSR (Multiple-Route Zone-based Hierarchical Source Routing) ルーティングが提案されている^[6]。MR-ZHSR ルーティングでは、複数経路を構築することにより、経路上のリンクが切断された場合でもただちに経路を切り替えることが可能である。しかし、これまでの MR-ZHSR ルーティングに関する研究では簡易な実装におけるパケット到着率による評価は行われているが、経路切り替えに伴う遅延やトラフィック量などについては評価されていない。

そこで、本論文ではネットワークシミュレータである GloMoSim^[7,8]を用い、実際のネットワークに近い環境を実装し、従来の ZHLS ルーティングと MR-ZHSR ルーティングの実装および評価を行う。そして得られた評価を考察として与える。

以下、2章で従来方式である ZHLS ルーティングと MR-ZHSR ルーティングについて述べる。3章で、シミュレーションによる実装と評価を行い MR-ZHSR ルーティングの有効性を検証する。最後に4章でまとめと今後の課題を示す。

2. 階層型ルーティングプロトコル

本章では、ZHLS ルーティングと MR-ZHSR ルーティングについて述べる。

2.1 ZHLS ルーティング

ZHLS ルーティングでは、ネットワークを重ねりのない正方形のゾーンに区切る。各ノードは、GPS (Global Positioning System) を用いることにより、位置と対応するゾーン ID を知る。ZHLS ルーティングは、ゾーン内の経路制御を行うノードレベルとゾーン間の経路制御を行うゾーンレベルの2階層に分けてルーティングを行う。図1 (A), (B) にそれぞれ、ノードレベル、ゾーンレベルのネットワークを示す。メッセージ配信時は、ゾーン ID とノード ID を指定してパケットを送信する。ZHLS ルーティングを実現するために、各ノードは、2種類の LSP (Link State Packet) を用いる。1つは、ノード LSP であり、リンク状態にある隣接ノードのリストが含まれ、同一ゾーン内のノードに送信される。もう1つは、ゾーン LSP であり、リンク状態にある隣接ゾーンのリストが含まれ、ネットワーク上の全てのノードへ送信される。

2.1.1 ルーティングテーブル

ここでは、ノードレベル、ゾーンレベルのそれぞれのルーティングテーブルの作成方法について述べる。

(1) ノードレベル

以下に、ノードレベルのリンク状態を把握する手順を示す。

- a) あるノード S は隣接ノードにリンクリクエストをブロードキャスト。
- b) ノード S からリンクリクエストを受信したノードはノード ID とゾーン ID をリンクレスポンスとしてノード S に返信。
- c) ノード S は、リンクレスポンスを受信すると、ノード LSP を作成し、同一ゾーン内にブロードキャスト。 □

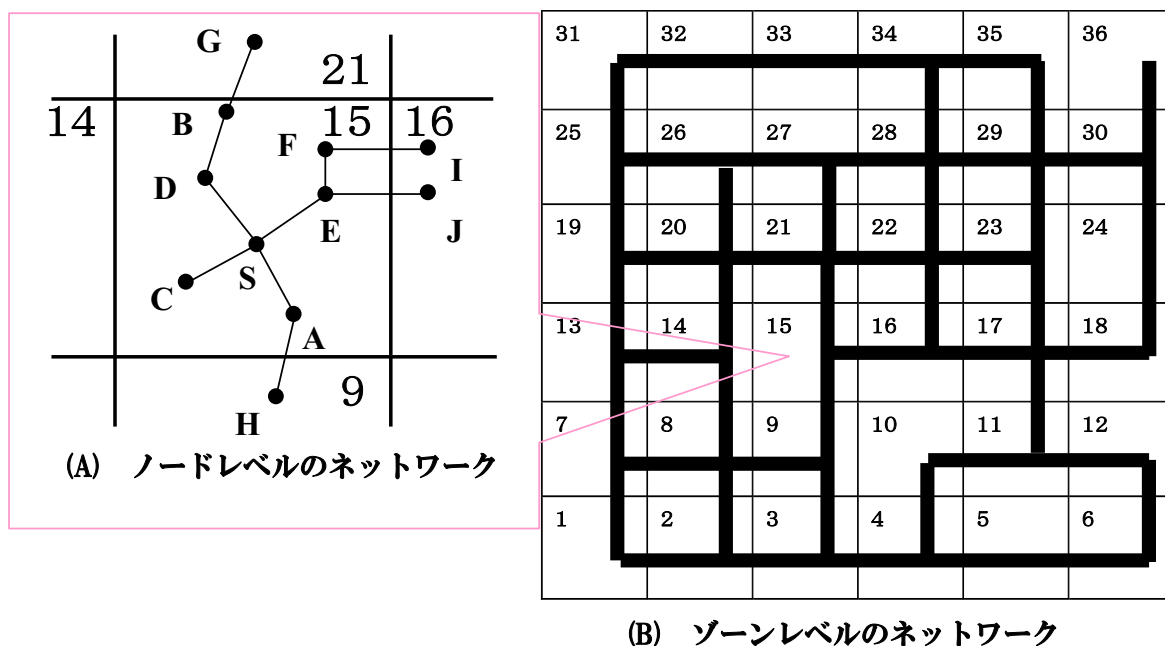


図1. ZHLS ルーティングにおけるネットワーク構成

Node	Node LSP
S	A,C,D,E
A	S,9
B	D,21
C	S
D	S,B
E	S,F,16
F	E,16

図2. ゾーン15のノードレベルリンク状態テーブル

Destination	Next Node
A	A
B	D
C	C
D	D
E	E
F	E
9	A
21	D
16	E

図3. ノードSのゾーン内ルーティングテーブル

Zone	Zone LSP
1	2,7
2	1,3,8
3	2,4,9
•	
15	9,16,21
16	15,17,22
•	
35	29,34
36	30

図4. ゾーンレベルリンク状態テーブル

以上の動作をゾーン内の各ノードが行うことにより、ノードレベルのリンク状態テーブルを作成し(図2)、これを元に SPF (Shortest Path First) アルゴリズムを用いてゾーン内のルーティングテーブルを作成する(図3)。この手順を定期的に行うことにより、新しいノードの発見やリンク状態の更新を行う。

(2) ゾーンレベル

以下に、ゾーンレベルのリンク状態を把握する手順を示す。

a) 他のゾーンと接するノードであるゲートウェ

イノードがゾーン内の各ノードから受信したゾーン LSP をネットワーク全体へブロードキャスト。

b) 隣接ゾーンで仮想的なリンクが確立。 □

以上の動作を行うことにより、ゾーンレベルのリンク状態テーブルを作成し(図4)、あて先ゾーンまでに経路するゾーン数を元に SPF アルゴリズムを用いゾーンレベルでの経路を決定し、ゾーン内のルーティングテーブルと合わせてゾーン間のルーティングテーブルを作成する(図5)。この手順を定期的に行うことにより、ゾーン間のリンク状態を更新す

Destination Zone	Next Zone	Next Node
1	9	A
2	9	A
•		
16	16	E
17	16	E
•		
35	16	E
36	16	E

図5. ノードSのゾーン間ルーティングテーブル

る。また、トラフィックの増加を防ぐため、ゲートウェイノードはゾーン LSP が更新された場合のみブロードキャストを行う。

このように、同じゾーン内のトポロジを把握し、それ以外の部分に関してはゾーン間のリンク状態のみを管理することにより、経路制御情報を低減することができる。

2.1.2 経路探索

ZHLS ルーティングでは、メッセージを配信する前にあて先ノードのゾーン ID を把握する必要がある。あて先ノードが送信ノードと同じゾーンに属している場合は、ゾーン内ルーティングテーブル（図3）を用いてメッセージを配信する。あて先ノードが送信ノードと異なるゾーンに属している場合は、ロケーションリクエストをそれぞれのゾーンに送信する。ロケーションリクエストを受信した各ゲートウェイノードは、あて先ノードがゾーン内にあるか確認を行い、あて先ノードが同一ゾーン内に存在する場合はロケーションレスポンスとしてゾーン ID を返信する。送信ノードは、あて先ノードのゾーン ID を把握したのち、あて先ノードのゾーン ID、ノード ID を指定してメッセージ配信を行う。あて先ノードの属するゾーンまでは、ゾーン間ルーティングテーブル（図5）を用いてルーティングを行い、あて先ノードの属するゾーン内では、ゾーン内ルーティングテーブル（図3）を用いてルーティングを行う。このように、ZHLS ルーティングプロトコルではゾーン ID、ノード ID のみを指定して通信を行

うため、データ配信中にトポロジが変化した場合でも迂回経路に切り替え通信を継続できるという特徴を持つ。

2.1.3 ZHLS ルーティングの問題点

ZHLS ルーティングでの通信はノードレベル、ゾーンレベルのそれぞれのテーブルを利用してルーティングを行う自律ルーティングであるため、経路はルーティングテーブルにより一意に決まってしまう。そのため、経路上のリンクが切断された場合に全てのテーブルが更新されるまで経路の切り替えを行うことができないという問題がある。そこで、単一の経路のみではなく、経路構築時にバックアップ経路となる複数経路を構築するプロトコルが求められる。

3. MR-ZHSR ルーティング

本章では、上記の問題を解決するために、ZHLS を拡張した手法（MR-ZHSR）を提案する。MR-ZHSR ルーティングでは、単一経路のみではなく、ゾーンレベルで重複のない複数経路を構築することにより、経路上のリンクが切断された場合でも、テーブルの更新を待たずに、ただちに経路を切り替えることができる。

MR-ZHSR ルーティングでは複数経路を構築する際に、ゾーンレベルの経路情報を送信者が保持するソースルーティングで行う。複数経路構築をソースルーティングで実現するために、あて先のゾーン ID、ノード ID に加え、ゾーンレベルでの経路情報をヘッダに追加し、送信者はメイン経路と複数のバックアップ経路を維持する。なお、メイン経路とは、通信を開始するときに使用する経路、もしくは、経路再構築後に通信中の経路を指し、バックアップ経路とは、メイン経路以外の有効な経路である。ここで、有効な経路とは、送信者からあて先ノードまでのリンクが確立している経路である。

MR-ZHSR ルーティングは以下に示す2つの構成からなり、次節でその詳細について述べる。

- (1) 複数経路構築の手順
- (2) 経路切断時の動作

3.1 複数経路構築手順

MR-ZHSR ルーティングにおいて、ルーティング

	ゾーン系列	ルートフラグ
メイン経路	8,9,10,16,17,23,29	✓
バックアップ経路 1	8,14,20,21,22,28,29	
バックアップ経路 2	8,2,3,4,5,6,12,18,24,30,29	
バックアップ経路 3		
再構築経路 1		
再構築経路 2		
再構築経路 3		

図6. ルートキャッシュ

テーブル作成までの手順は ZHLS ルーティングと同様であるが、送信者が通信する際の経路構築方法において異なる。

以下に、MR-ZHSR ルーティングにおける経路構築の手順を示す。

ここで、ルートキャッシュテーブル図6において、バックアップ経路 i に対応するゾーン系列フィールドを $Br(i)$ 、再構築経路 j に対応するゾーン系列フィールドを $Rr(j)$ と表す ($i=1,2,3$, $j=1,2,3$)。

[メイン経路構築]

STEP 1-1

あて先ゾーンまでに経由するゾーン数を元に SPF アルゴリズムを用いて、メイン経路を構築する。

STEP 1-2

メイン経路をルートキャッシュに保持し、ゾーンレベルのリンク状態テーブルのメイン経路で使用したゾーンにフラグを付ける。

STEP 1-3

メイン経路にルートフラグを付ける。なお、ルートフラグは現在通信中の経路の判別に使用される。

[バックアップ経路構築]

STEP 1-4

$n=1$ とする。

STEP 1-5

テーブルにフラグの付いたゾーンを除いた経路が構築可能であれば、あて先ゾーンまでに経由するゾーン数を元に SPF アルゴリズムを用いて、バックアップ経路 n を構築する。

経路を構築できない場合は処理を終了する。

STEP 1-6

バックアップ経路 n を $Br(n)$ に保持し、ゾーンレベルのリンク状態テーブルのバックアップ経路 n で使用したゾーンにフラグを付ける。

STEP 1-7

n の値を 1 増加させる。

$n=3$ の場合は処理を終了する。

$n=3$ 以外の場合は STEP 1-5 に戻り、処理を継続する。 □

この方法により、MR-ZHSR ルーティングでは図7のように最大4本のリンクを共有しない経路を構築することができる。

3.2 経路切断時手順

以下に、経路切断時の動作を示す。

STEP 2-1

ノードの移動などにより、通信中の経路が切断されると、切断された経路のルートフラグをクリアする。

STEP 2-2

有効なバックアップ経路がある場合は、そのバックアップ経路に切り替え、ルートフラグを付ける。

STEP 2-3

ゾーンレベルのリンク状態テーブルから切断された経路で使用されていたゾーンのフラグをクリアし、切断された経路をルートキャッシュから削除する。 □

4. 実装と評価

本章では、ZHLS ルーティング、MR-ZHSR ルーティング、そして比較のために階層化を行わない

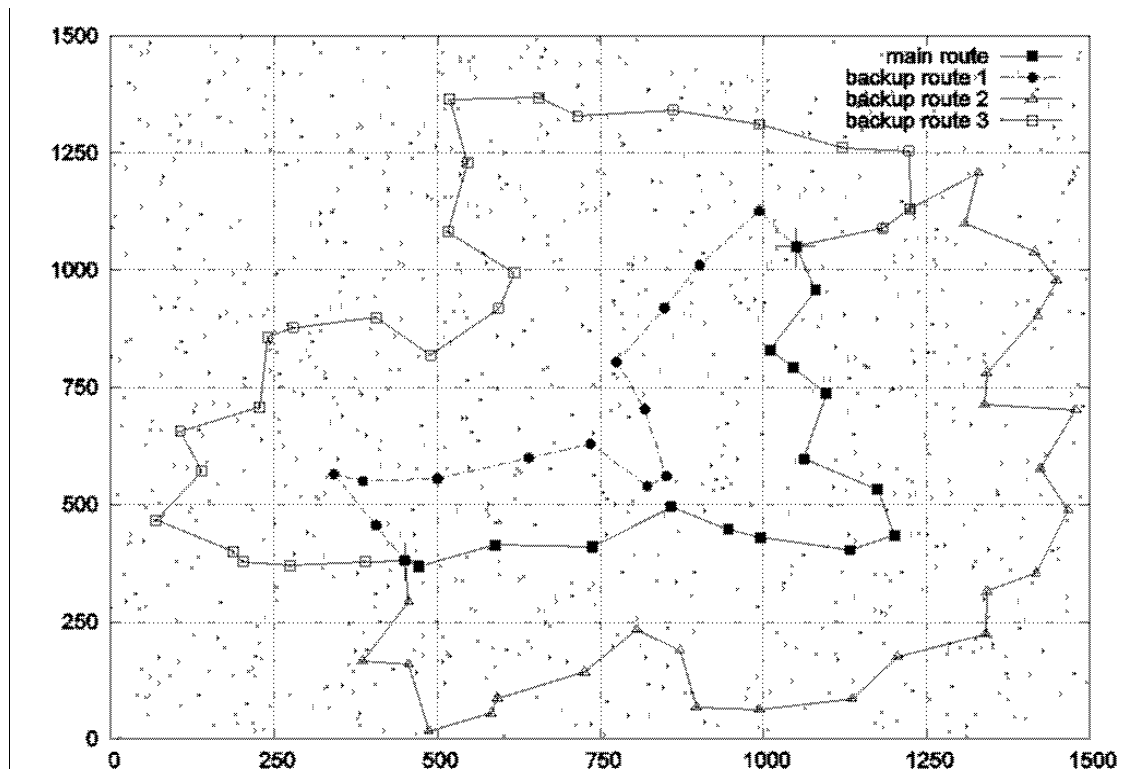


図7. MR-ZHSR ルーティング方式での複数経路構築例

フラットなネットワークにおける LSR (Link State Routing) ルーティングの 3 つの方式をネットワークシミュレータである GloMoSim 上で実装し、評価する。

4.1 実装

ZHLS,MR-ZHSR ルーティングを実装するために、階層型ルーティングを採用した ZRP (Zone Routing Protocol) ルーティング⁹⁾を参考にし、モジュール設計を行った(図8)。階層型ルーティングは、ゾーン内のルーティングを行う Intra-zone Routing Protocol(IARP), ゾーン間のルーティングを行う IntEr-zone Routing Protocol(IERP), IARP によって提供されるトポロジ情報を、ゾーンの境界まで送信する Bordercast Resolution Protocol(BRP), そして近隣ノードやリンク切れを検出する Neighbor Discovery Protocol(NDP)から構成される。

ZRP ルーティングでは、ホップ数を元にゾーンの範囲を決定する。それに対し、ZHLS, MR-ZHSR ルーティングでは、位置情報を元にゾーンの範囲を

決定する。また、宛先の端末が、異なるゾーンに属している場合、ゾーン内の代表の端末であるゲートウェイノードがパケットを中継する。

ここでは、ZHLS,MR-ZHSR,LSR ルーティングを PARSEC 言語¹⁰⁾により実装し、Pentium4 2.6GHz,1GB Memory, FreeBSD 6.0 という環境でシミュレーションを行った、なお、プログラムは約 5000 行になった。

4.2 評価

ノード数が多い場合でも、階層型ルーティングは Proactive 型や Reactive 型のルーティングに比べて、経路制御情報量を削減できることを確認する。ここでは特にネットワークトポロジを作成する際の経路制御情報量について数値解析およびシミュレーションを行った結果について示す。

4.2.1 数値解析

ネットワークトポロジを作成する際の経路制御情報量に関して数値解析を行う。LSR ルーティングでは、あるノードは 1 つの LSP を作成し、それをネットワークの全てのノードに転送するため、ノード数を N とすると、メッセージ数の合計 SL_{lsr} は、

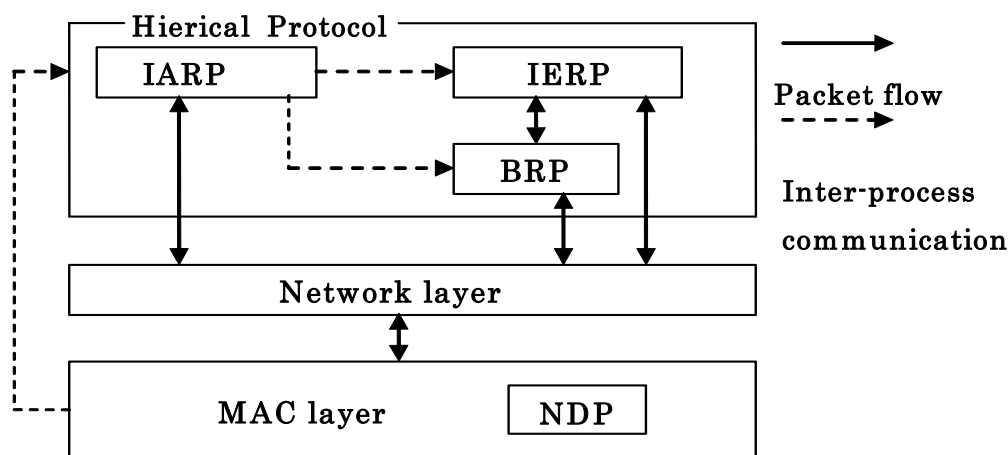


図8. モジュール構成

$$S_{Lsr} = k N^2$$

となる。ここで k は定数とする。

ZHLS ルーティングでは、ネットワークを M 個のゾーンに分割するためノード LSP の総数は $S_{node} = N^2 / M$ となる。また、各ゾーンは1つのゾーン LSP を作成し、他の全てのゾーンへ転送することにより、ゾーン LSP の総数は、 $S_{zone} = NM$ となる。よって、メッセージ数の合計 S_{Zhls} は、

$$S_{Zhls} = kN^2 / M + NM$$

となる。

MR-ZHSR ルーティングでは、ネットワークトポロジ作成においては、ZHLS ルーティングと同様の方式であり経路制御情報は同等である。よって、メッセージ数の合計 $S_{MR-ZHSR}$ は、

$$S_{MR-ZHSR} = kN^2 / M + NM$$

となる。

4.2.2 シミュレーションによる分析

1000m四方のネットワークに 10~100 個の端末をランダムに配置し、各端末はランダムウェイポイントモデルで移動するものとした。端末の移動速度は、速度 $v=0\sim 10$ [m/s], Pause Time= 5[sec]とした。

なお、ネットワークトポロジを作成する際の経路制御情報を評価するためにシミュレーション時間は 30[s]とし、50 回行った平均を結果とした。なお、1 回のシミュレーション結果を得るまでに約 36 秒かかった。図9にシミュレーションによるネットワークトポロジを作成する際の経路制御情報を示す。

4.3 考察

図9より、端末数が多い場合でもネットワークを階層化することにより、経路制御情報を削減できることが分かる。

図10に、数値解析による値とシミュレーションによる値の比較を示す。同図より、3.2.1で示した数値解析による値とシミュレーションによる値が概ね一致していることから、本評価手法の有効性が確認できる。また、端末数が少ない場合においては、ゾーン数が少ない方が経路制御情報を減らすことができるが、端末数が多くなると経路制御情報が増大する。これより、端末数に対する適切なゾーン数を設定することにより経路制御情報を減らすことができると考えられる。

5. まとめ

本論文では、MR-ZHSR について、経路切り替えに伴う遅延やトラフィック量について、実際のネットワークに近い環境で評価を行うために、ネットワークシミュレータである GloMoSim を用い、実装を行った。

シミュレーションにより、既存方式と比較して、ネットワークトポロジを作成する際のトラフィックを削減できた。

今後の課題として、複数経路構築部分の実装を進め、経路切り替えに伴う遅延を評価する必要がある。また、一定の範囲に通信障害が発生した場合などの

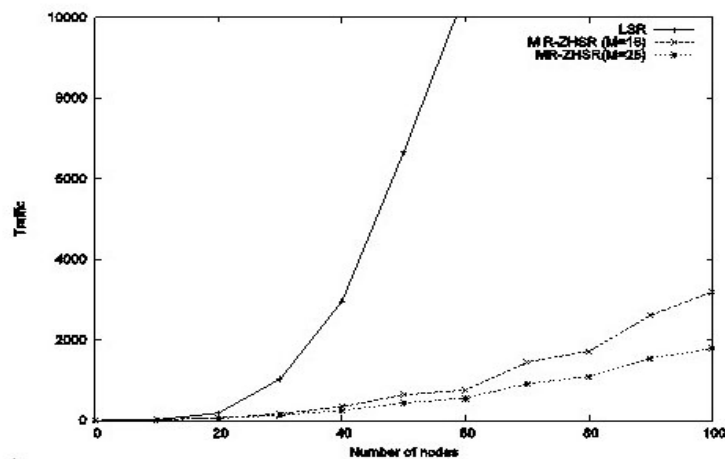


図9. ネットワークトポロジを作成する際の経路制御情報量

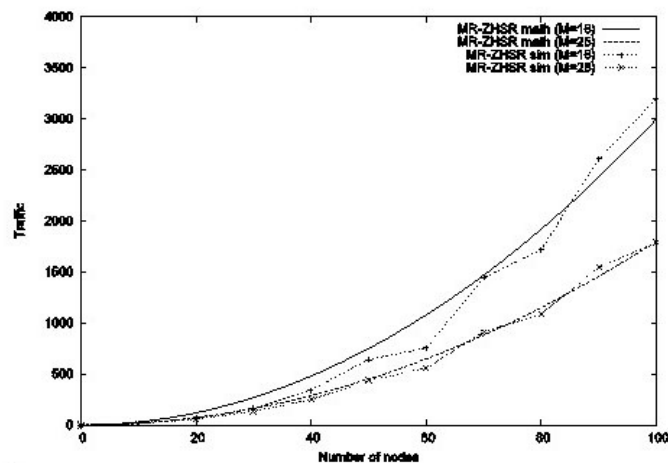


図10. 数値解析による値とシミュレーションによる値の比較

より現実的に起こりうる状況を想定したシミュレーションを行う予定である。

参考文献

- [1] "IP Mobility Support for IPv4", RFC3344, 2002
- [2] 楯岡 孝道, "DNSによるIP移動透過性の実現", IPSJ Magazine, Vol.44, No.6, pp.656-657, 2003.
- [3] 岡崎 直宣, 板山 俊一, "NATを用いたIP移動透過性の検討", 宮崎大学工学部紀要, Vol.33, pp. 391-398, 2004.
- [4] 馬場 達也, "マスタリングIPsec", オイラリー・ジャパン, 2001.
- [5] D. Maughan "Internet Security Association

and Key Management Protocol (ISAKMP)", RFC2408, 1998, RABA Technologies, Inc.

- [6] 井戸上 影, 久保 健, 横田 英俊, "プライベートアドレスを使用するモバイルネットワーク間のローミング手順とその実装", 情報処理学会, Vol44, No12, pp. 2958-2967, 2003.
- [7] 山下 裕, 田中 康之, 木村 徹, 小野 夏子, 寺岡 文男, "FMIPv6における高速認証方式の提案と検証", 情報処理学会, Vol46, No9, pp. 2205-2213.
- [8] R. Droms, "Dynamic Host Configuration Protocol", RFC2131, 1997.
- [9] 岡崎 直宣, 末吉 寿光, "階層型ネットワークアドレス変換を用いたIP移動透過性の実現", 宮崎大学工学部紀要 Vol.34, pp. 391-398, 2005.