

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検討

油田 健太郎¹⁾・本田 浩一²⁾・岡崎 直宣³⁾・冨田 重幸⁴⁾・朴 美娘⁵⁾

A Study on Multiple-Route Zone-Based Hierarchical Source Routing for Ad Hoc Networks

Kentaro ABURADA, Kouichi HONDA, Naonobu OKAZAKI, Shigeyuki TOMITA, Park Mi Rang

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, multipath protocols are required. In this paper, we 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, the route can be switched to another route without delay for re-routing.

Key Words :

Ad Hoc Network, Multipath Route, Routing Protocol

1. はじめに

近年、無線端末の発達と普及により、その適用できる範囲が広がり、固定のインフラがない場所でもネットワークを構築したいという要求が高まりつつある。そこで、移動端末（以下、ノード）のみで構成される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、ノード同士が無線通信により直接情報を交換する。また、電波が届かず直接通信できないノード同士も、その間

に存在するノードが中継を行うことにより、情報を交換できる。適用効果の高い例として、災害時に既存のインフラが使用できない場合の代用、イベント会場で使用する一時的なネットワーク構築などが挙げられる。

ノードがマルチホップ通信を行う場合には、経路情報を獲得しなければならない。従来のネットワークでは、ルータのみによってメッセージの配信が行われていたが、アドホックネットワークでは、全てのノードがメッセージの配信を行い、かつ、ノード自身も移動することから既存の有線ネットワークとは異なるルーティングプロトコルが必要とされる。また、リンク切断などに対応したロバスタな方式である必要もある。アドホックネットワークでは、大きく分けて2つの方式が提案されている。1つは、Proactive方式であり、定期的な経路情報の交換によりネットワーク全体のトポロジを管理する¹⁾。この方式では、すぐにメッセージの配信が可能だが、経路情報維持のための制御量が

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) 情報システム工学学科助教授
4) 情報システム工学学科教授
5) 三菱電機(株)

大きい。もう1つは、Reactive方式であり、メッセージ配信時に経路構築を行う^{2),3)}。この方式では、定期的な経路情報の交換を行わないため、メッセージ配信要求がない場合には経路制御パケットが発生しないが、ルーティングテーブルのキャッシュにない送信先へメッセージを配信する場合には、経路構築後にメッセージを配信するため時間がかかってしまう。通常、ノードはバッテリー、帯域などが限られており、通信によるオーバーヘッドを減らすことは重要な課題である。そこで、Proactive方式とReactive方式の両方の長所を取り入れたHybrid方式が提案されている^{4)-7),11)}。Hybrid方式では、経路情報の交換をある範囲に限定して行い、それ以外の範囲では、メッセージ配信時に経路構築を行う。これにより、経路情報維持のための情報量を減らすことができる。このような、Hybrid方式であるルーティングプロトコルとしてZHLS (Zone-based Hierarchical Link State) ルーティング方式が提案されている^{5),6)}。

アドホックネットワークでは、ノード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、単一の経路だけしか構築されないルーティングプロトコルでは、経路上のリンクが切断された場合に経路再構築まで時間がかかるという課題がある。特にリアルタイム性が求められるアプリケーションに対してはその影響が大きい。しかしながら、ZHLSルーティング方式では単一の経路しか構築されない。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⁸⁾⁻¹¹⁾。

そこで本論文では、ZHLSルーティング方式を拡張し、複数経路構築に対応したMR-ZHSR (Multiple-Route Zone-based Hierarchical Source Routing) ルーティング方式を提案する。提案方式では、重複のない複数の経路を構築することにより、経路切り替えの際に、どのリンクが切断されたかを特定する必要がなく、ただちに経路を切り替えることができる。さらに、ノードレベルではなく上位層であるゾーンレベルで複数経路を構築することにより、互いに相関の低い経路を構築することができ、リンク切断による影響を抑えることが可能となる。

以下では、2. で従来方式であるZHLSルーティング方式について述べる。3. では、提案方式について述べる。4. で数値解析、5. でシミュレーションによる評価を行うことで提案方式の有効性を示す。6. はまとめである。

2. ZHLSルーティング方式

本章では、従来方式であるZHLSルーティング方式について述べる。

ZHLSルーティング方式では、ネットワークを重ねのりのないゾーンに区切る。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。そして、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ルーティング方式を実現するために、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 クラスタリング

本節では、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。

2.1.1 ノードレベル

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する。
- (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、それを同一ゾーン内にブロードキャスト。 □

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。

2.1.2 ゾーンレベル

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が発生するゾーン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由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

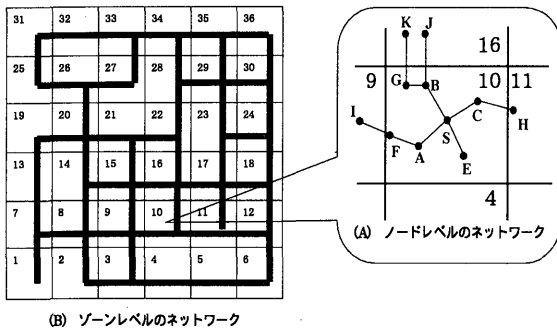


図1 ZHLSルーティング方式におけるネットワーク構成。

Zone	Zone LSP
1	7
2	3,8
3	2,4
*	
9	3,8,10,15
10	9,11,16
*	
35	29,34,36
36	30,35

図4 ゾーンレベルのリンク状態テーブル。

Destination Zone	Next Zone	Next Node
1	9	A
2	9	A
3	9	A
*		
9	9	A
11	11	C
*		
35	16	B
36	16	B

図5 ノードSのゾーン間のルーティングテーブル。

Node	Node LSP
S	A,B,C,E
A	S,F
B	S,G,16
C	S,11
E	S
F	A,9
G	B,16

図2 ゾーン10のノードレベルのリンク状態テーブル。

Destination	Next Node
A	A
B	B
C	C
E	E
F	A
G	B
9	A
11	C
16	B

図3 ノードSのゾーン内ルーティングテーブル。

り、ゾーン間のリンク状態を更新する。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、経路制御情報量を低減することができる。

2.2 経路制御

ZHLSルーティング方式では、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。ZHLSルーティング方式ではゾーン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。

しかしながら、ZHLSルーティング方式は、ゾーンレベル、ノードレベルともに自律ルーティングであり、あるゾーンに属するノードと通信を行う場合において、その経路はルーティングテーブル(以下、テーブル)により一意に決まってしまうため、通信リンクが切断されると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。リンク切断による影響を抑えるためにテーブル更新間隔を短く設定した場合には、ノードの負荷、経路制御情報量を増大させてしまう。ゆえに、通信リンクが切断された場合において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、さらにテーブル更新間隔が長い場合においてもロバスタな通信方式が求められる。

3. 提案方式

本論文では、アドホックネットワーク上においてもロバスタな通信手法を実現するために従来方式であるZHLSルーティング方式を拡張する。

提案方式では、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、切断されたリンクを特定する必要がない。さらに、ノードレベルではなく上位層であるゾーンレベルで複数経路を構築することにより、互いに相関の低い経路を構築することができ、リンク切断による影響を抑えることが可能となる。また、経路を切り替えた際の品質の

劣化を防ぐために、テーブル更新の際に複数経路の再構築を行う。

3.1 複数経路構築の実現方法

ZHLS ルーティング方式により複数経路構築手法を実現するためには、送信ノード、受信ノードの組みごとの経路情報をネットワーク上の全てのノードが持つ必要がある。よって、ノードの負荷およびトラフィックを増加させてしまう。

そこで、複数経路を構築する際にゾーンレベルにおいてソースルーティングを用いたMR-ZHSR ルーティング方式を提案する。MR-ZHSR ルーティング方式では、複数経路の情報を送信ノードのみ保持すればよく、経路制御に必要なトラフィックを抑えることができる。ソースルーティングを実現するために、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する。また、送信者は複数の経路を保持するとともにあて先ノードへの何番目の経路であるかを把握する必要がある。

3.2 MR-ZHSR ルーティング方式

提案方式による、経路構築方法について示す。なお、ネットワークトポロジを作成するまでの手順はZHLSルーティング方式と同様である。

図6に、MR-ZHSR ルーティング方式の動作をフローチャートに示す。さらに、3.2.1節に複数経路の構築手順、3.2.2節に複数経路の再構築手順について述べる。

3.2.1 複数経路の構築手順

MR-ZHSR ルーティング方式では、テーブル更新時に複数経路構築手法を定期的に行うことにより複数経路の構築を行う。複数経路は通信開始時に使用されるメイン経路と予備経路である複数のバックアップ経路から構成される。複数経路構築手法では、複数経路を保持するために、構築したゾーンレベルでの経路情報をルートキャッシュ(図7)のゾーン系列フィールドに書く。また、現在通信中の経路を判別するために、ルートキャッシュのルートフラグフィールドにフラグを付ける。なお、ルートキャッシュにおいて、メイン経路をMr、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]とする(i,j=1,2,3)。ここで、i,jともに3までとなるのは、ゾーンを四角形に区切るためである。ただし、ゾーンの区切り方を正六角形などにすることにより拡張できると考えられる。

以下に、MR-ZHSR ルーティング方式における複数経路構築手法および経路切断時の動作を示す。

[複数経路構築手法]

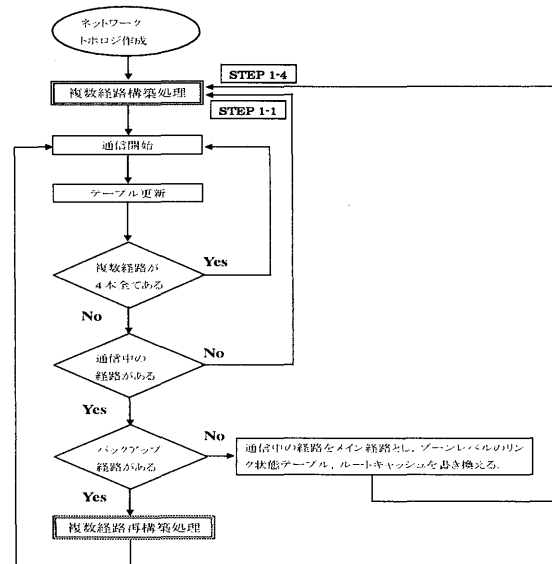


図6 MR-ZHSR ルーティング方式の動作。

[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。メイン経路が構築されている場合には、STEP 1-4から処理を行う。

STEP 1-2

メイン経路をMrに保持し、ゾーンレベルのリンク状態テーブルにメイン経路で使用したゾーンのフラグを付ける。

STEP 1-3

メイン経路にルートフラグを付ける。

[バックアップ経路構築]

STEP 1-4

n=1とする。

STEP 1-5

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、n番目のバックアップ経路を構築する。構築できない場合は処理を終了する。

STEP 1-6

n番目のバックアップ経路をBr[n]に保持し、ゾーンレベルのリンク状態テーブルにn番目のバックアップ経路で使用したゾーンのフラグを付ける。

STEP 1-7

nの値を1増加させる。

STEP 1-8

nの値が3の場合は処理を終了する。

nの値が3以外の場合はSTEP 1-5に戻り、処理を継続する。 □

経路番号	ゾーン系列	ルートフラグ
Main route (Mr)	8,9,10,16,17,23,29	✓
1st Backup route (Br[1])	8,14,20,21,22,28,29	
2nd Backup route (Br[2])	8,2,3,4,5,6,12,18,24,30,29	
3rd Backup route (Br[3])		
1st Restructured route (Rr[1])		
2nd Restructured route (Rr[2])		
3rd Restructured route (Rr[3])		

図7 ルートキャッシュの例.

[経路切断時の動作]

STEP 2-1

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

STEP 2-2

経路の切り替えが可能なバックアップ経路がある場合は、(n+1) 番目のバックアップ経路に切り替える。

STEP 2-3

(n+1) 番目のバックアップ経路にルートフラグを付ける。

STEP 2-4

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

複数経路構築手法により、MR-ZHSR ルーティング方式ではメイン経路および最大 3 本のバックアップ経路を構築することができる。また、構築される複数経路はリンクを共有しない経路のため、使用しているリンクが切断された場合にも切断箇所を特定する必要なく、ただちに他の経路に切り替えることができる。

図 8 に複数経路構築手法により構築した複数経路の例を示す。図中の LSR (Link State Routing) は階層化を行わないフラットなルーティング方式である。図 8 では、メイン経路に加えて 3 本のバックアップ経路が構築されている。

3.2.2 複数経路の再構築

3.2.1 節で示した方法により、複数経路の構築を行うとメイン経路に比べてバックアップ経路は、経由するゾーン数も増え経路が長くなってしまいう可能性が高い (図 8)。そこで、経路を切り替えた際の品質の劣化を防ぐために、テーブル更新の際に複数経路の再構築を行う。複数経路の再構築は、すぐに他の経路情報を破棄するのではなく、再構築中に経路の切り替えが起こっても対処できるように、経路情報を保持しつつ、再構築が終了した段階で経路情報を入れ替える。そのため、複数経路の再構築は、バックアップ経路がある場合のみ実行する。バックアップ経路がない場合は、通信中の経路をメイン経路とし、ゾーンレベルのリンク

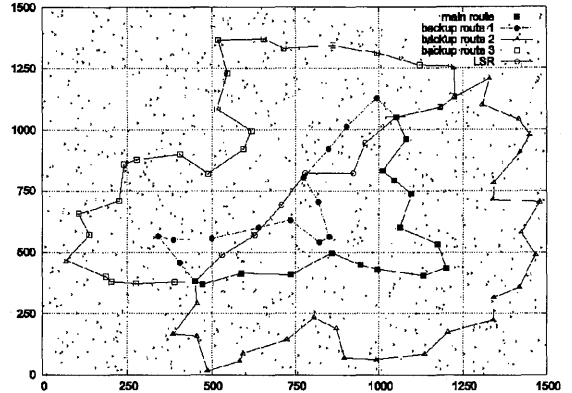


図8 MR-ZHSR ルーティング方式による複数経路構築の例.

状態テーブル、ルートキャッシュを書き換え、STEP 1-4 より複数経路の構築を行う。また、通信中の経路がない場合には、STEP 1-1 より複数経路の再構築を行う。なお、テーブル更新時に経路の切断が起こっておらず、既に経路が 4 本ある場合は、再構築および複数経路の構築は行わず、通信を継続する。

以下に、複数経路の再構築の手順を示す。

[複数経路の再構築]

STEP 3-1

テーブル更新時に複数経路の再構築を行う。通信中の経路を n 番目の経路とした時に、(n+1) 番目のバックアップ経路を保持したまま、n の経路が使用しているゾーンを除いた複数経路を構築する。ただし、構築した経路は Rr[m] に保持する (m=1,2,3)。

STEP 3-2

n 番目の経路が切断されずに複数経路の再構築が終了した場合は、(n+1) 番目以降のバックアップ経路で使用されていたゾーンのフラグをクリアし、ルートキャッシュから削除する。

再構築が終了する前に n 番目の経路が切断された場合は、経路切断の処理を行い、(n+1) 番目のバックアップ経路をメイン経路とする。

STEP 3-3

通信中の経路をメイン経路とし、ルートフラグを付ける。

STEP 3-4

Rr[m] を Br[n] コピーし、Rr[m] を削除する (m,n=1,2,3)。 □

4. 数値解析

本章では、ネットワークトポロジを作成する際の経路制御情報量、経路構築にかかる計算量の 2 つの観点から評価を行うために、数値解析により、LSR ルーティング方式、ZHLS ルーティング方式、そして提案方

式である MR-ZHSR ルーティング方式の3つの方式で比較を行った。

4.1 経路制御情報量

本節では、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 ルーティング方式では、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。よって、メッセージ数の合計 S_{LSR} は、 $S_{LSR} = N^2$ messages となる。ここで、 N は全ノード数を表す。

これに対して、ZHLS ルーティング方式では、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、それぞれのゾーンは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、 $S_{ZHLS} = N^2/M + NM$ messages となる。

MR-ZHSR ルーティング方式では、ネットワークトポロジの作成においては、ZHLS ルーティング方式と同様の方式であり経路制御情報量は同等である。よって、メッセージ数の合計 $S_{MR-ZHSR}$ は、 $S_{MR-ZHSR} = N^2/M + NM$ messages となる。

図9に LSR ルーティング方式、MR-ZHSR ルーティング方式でのネットワークトポロジを作成する際の経路制御情報量を示す。なお、MR-ZHSR ルーティング方式におけるゾーン数は16, 25, 36ゾーンとした。同図より、ノード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、経路制御情報量を削減できることが分かる。

4.2 経路構築にかかる計算量

本節では、経路構築にかかる計算量について数値解析を行う。

LSR ルーティング方式では、ダイクストラ法を用いて最短経路を計算するため、その計算量は、 $C_{LSR} = O(N^2)$ となる。

これに対して ZHLS ルーティング方式では、1つのゾーン内においては、(ノード数/ゾーン数)² となり、これにゾーン数を乗ずることにより、ノードレベルの計算量は、 $C_{node} = O(N^2/M)$ となる。さらに、ゾーンレベルでは M 個のゾーンの中から最適経路を計算するため、 $C_{zone} = O(M^2)$ となり、計算量の合計 C_{ZHLS} は、 $C_{ZHLS} = O(N^2/M + M^2)$ となる。

MR-ZHSR ルーティング方式では、ノードレベルの計算量は ZHLS ルーティング方式と等しく、ゾーンレベルでは複数経路を構築することから、 M 個のゾーンの中から最短経路を求める計算を最大で4回繰り返すことになる。しかし、計算量をオーダで表すと ZHLS ルーティング方式と同じ $C_{zone} = O(M^2)$ となり、計算量の

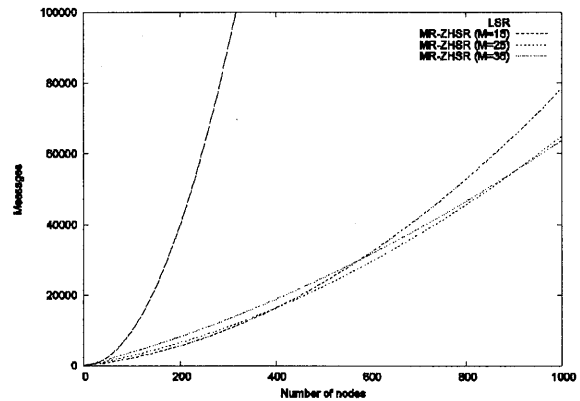


図9 ネットワークトポロジを作成する際の経路制御情報量。

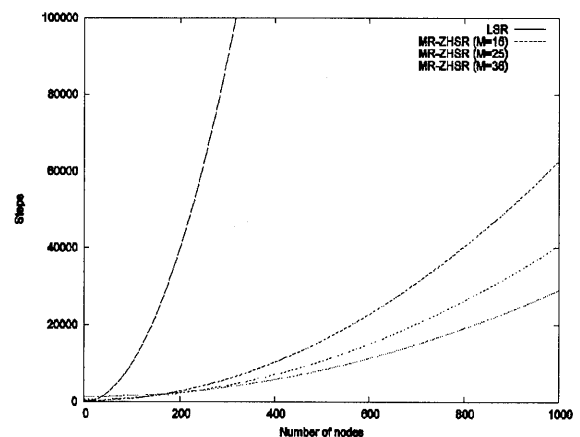


図10 経路構築にかかる計算量。

合計も等しくなる。よって、計算量の合計 $C_{MR-ZHSR}$ は、 $C_{MR-ZHSR} = O(N^2/M + M^2)$ となる。

図10に、LSR ルーティング方式、MR-ZHSR ルーティング方式の場合の経路構築にかかる計算量を示す。なお、MR-ZHSR ルーティング方式におけるゾーン数は16, 25, 36ゾーンとした。同図より、経路構築にかかる計算量においてもネットワークを階層化することにより、ノードの負荷を軽減できることが分かる。

5. シミュレーション

本章では、提案方式が従来の ZHLS ルーティング方式や LSR ルーティング方式と比較してロバストな方式であることを示すために、パケットの到達率の観点から、シミュレーションにより評価を行った。

5.1 パケット到着率

ここでは、パケット到着率を送信ノードが送ったパケットが受信ノードに到達した割合と定義する。

以下にシミュレーション環境を示す。ゾーン数を 6×6 の36ゾーンに固定し、1500[m]四方のネットワークに1000個のノードをランダムに配置した。ノードの移動にかかる時間を1サイクルと定義し、ノードの移動速度、ノードの通信半径、テーブルの更新間隔の3つを

パラメータとして設定する。ノードはサイクルごとに上下左右いずれかの方向にランダムに移動する。通信半径は、1度のシミュレーションでは全てのノードが同じ通信である。シミュレーションでは、100サイクルを1回とみなし、100回行い平均値を結果とした。さらに、パラメータの値を変更しながら複数回行い、それぞれの方式での比較を行った。

なお、本シミュレーションでは、送信ノード、あて先ノードの初期位置を、それぞれ座標(400,400)(1100,1100)として実験を行い、3.2.2節で示した複数経路の再構築手法は未実装である。パケット到着率の判定は、LSRルーティング方式、ZHLSルーティング方式では、構築した経路が確立されている状態を到達可能とみなし、経路が切断された場合は、次のテーブル更新間隔までは到達不可とみなす。MR-ZHSRルーティング方式では、到達可能の判断は同じであるが、経路が切断された場合は、次のバックアップ経路に切り替える。そして、全てのバックアップ経路が切断された場合に到達不可とみなす。また、経路の切り替えは瞬時に行えると仮定し、それにかかるサイクルは0とした。

図11、図12に通信半径を、200、150[m]とした場合のパケット到着率のグラフを示す。また、各グラフには各方式でのテーブル更新間隔を10、20、30[cycle]と変化させた場合の結果も示す。

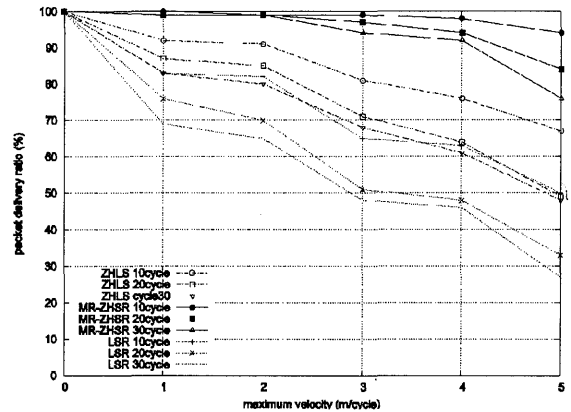


図11 通信半径 200[m]の場合のパケット到着率。

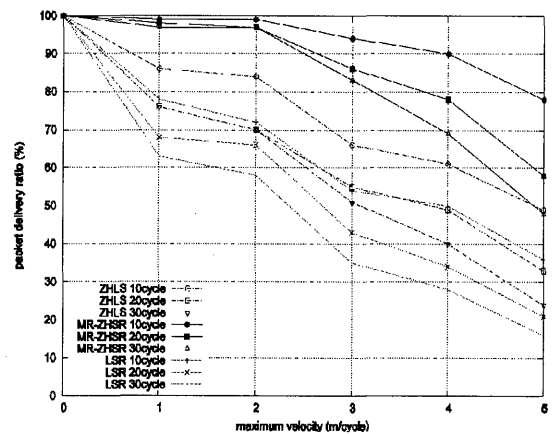


図12 通信半径 150[m]の場合のパケット到着率。

5.2 シミュレーション結果による考察

本節では、パケット到着率についてシミュレーションの結果より考察を行う。

まず、各方式に共通して言えることは、ノードの移動速度が速くなるにつれ、パケット到着率が下がることである。これは、1サイクルで移動できる距離の増加により、トポロジに変化が起こり、経路が切断されたと考えられる。また、通信半径の大きい方がパケット到着率が高いことが分かる。これは、通信半径が大きいと、ノードの移動が起こっても経路が切断されにくいからである。テーブル更新間隔に関しては、短い方がパケット到着率は高くなる。これは、テーブル更新間隔が短い方が経路切断により到達不可となった場合でも、テーブルの更新により到達可能状態により早く復帰することができるためである。

つぎに、フラットなネットワークで経路を構築するLSRルーティング方式とネットワークを階層化して経路を構築するZHLSルーティング方式、提案方式を比較すると、同じ更新間隔の場合において階層化を行うルーティング方式がより高いパケット到着率であることが分かる。これは、LSRルーティング方式では、全体のネットワーク上で最短経路を構築するため、ノード同士の通信範囲が重なり合う部分が少なく、ノードの移動により経路が切断されやすいためであると考え

られる。さらに、階層化を行うルーティング方式の中でも複数経路を構築する提案方式の方がZHLSルーティング方式と比べてパケット到着率が高い。これより、単一経路のみを構築する場合に比べて複数経路を構築した方がロバストな通信を行えることが分かる。提案方式では、経路が切断された場合においてもバックアップ経路に切り替えて通信を継続できることから、ノードの移動速度が5[m/cycle]のように速い場合でも高いパケット到着率を維持できる。さらに、ノードの移動速度が0~2[m]までの場合においては、提案方式ではテーブル更新間隔の値に関わらず95%以上の到達率を維持している。これに対して、既存手法では、通信半径が大きく、テーブル更新間隔が短い場合においてもノードの移動により急激にパケット到着率が下がる。これより、提案方式では、ノードの移動速度が低速な場合では、テーブル更新間隔が長い場合においてもロバストな通信を行えることが分かる。

また、テーブル更新間隔ごとにそれぞれの方式でのパケット到着率の平均を計算した場合、提案方式では、LSRルーティング方式と比べて約1.5倍、ZHLSルーティング方式と比べて約1.3倍の比率でパケット到着率が向上している。通常、パケット到着率を高く維持するためには、テーブル更新間隔を短く設定する必要

があるが、提案方式では、テーブル更新間隔が長い場合でも高い到着率を維持できることが分かる。

6. まとめ

本論文では、アドホックネットワークにおいてロバストな経路を構築することを目的としたMR-ZHSRルーティング方式を提案した。提案方式では、ZHLSルーティング方式を複数経路構築手法に拡張し、ゾーンレベルで重複のない複数経路を構築することで、経路が切断された場合でも、切断箇所を特定する必要なく、ただちにバックアップ経路に切り替えることができる。さらに、提案方式では、ゾーンレベルにおいてソースルーティングを用いることにより、複数経路の情報を全てのノードで保持する必要はなく、送信ノードのみに限られるため、経路制御にかかるトラフィックを抑えることができる。数値解析およびシミュレーションにより従来方式であるZHLSルーティング方式と比べて経路制御情報量、経路構築にかかる計算量を増加させることなく、ノードの移動速度が速く、テーブル更新間隔が長い場合においてもロバストな通信を行えることを示した。

今後の課題としては、今回のシミュレーションでは複数経路の再構築などの未実装の部分を実装し、経路の切り替えにかかる時間や経路構築にかかる時間を考慮した、より精度の高いシミュレーションを行う必要がある。また、通信のトラフィック量などの評価も行う予定である。

参考文献

- 1) C.E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers," *ACM Computer-Communication-Review*, Vol.24, No.4, pp.234-244, October 1994.
- 2) D.B.Johnson and D.A.Maltz, "Dynamic source routing in ad hoc wireless networks," *Mobile Computing*, T. Imielinski and H. Korth, pp.153-181, Kluwer, 1996.
- 3) C.E. Perkins and E M Royer, "Ad-hoc on-demand distance vector routing," *Proc 2nd IEEE Workshop Mobile Computing Systems and Applications*, pp.90-100, February 1999.
- 4) Z.J. Haas, "The zone routing protocol (ZRP) for ad hoc networks," *Internet Draft*, November 1997.
- 5) Mario Joa-Ng and I-Tai Lu, "A Peer-to-Peer Zone-Based Two-Level Link State Routing for Mobile Ad Hoc Network," *IEEE J.Sel Areas Commun*, Vol.17, No.8, pp.1415-1425, August 1999.
- 6) Mario Joa-Ng and I-Tai Lu, "A GPS-based peer-to-peer hierarchical link state routing for mobile ad hoc networks," *IEEE VTC 2000-spring*, Vol.3, pp.1752-1756, 2000.
- 7) 高橋 道人, 萬代 雅希, 笹瀬 巖, "アドホックネットワークにおける階層依頼型経路探索を用いた多階層ZHLSルーティング方式," *電子情報通信学会論文誌, IN*, Vol.J86-B, No.10, pp.2107-2116, October 2003.
- 8) 長谷部 顕司, 梅島 慎吾, 松垣 博章, "複数経路を用いた安定なメッセージ配送のためのアドホックルーティングプロトコル," *情報処理学会研究報告*, Vol.2002, No.49, pp.25-32 2002-5.
- 9) 浅野 知倫, 松垣 博章, "MANETのための複数経路を用いたルーティングプロトコルMR-LBSRとその性能評価," *情報処理学会研究報告*, Vol.2003, No.15, 2003-11.
- 10) 茂木 信二, 吉原 貴仁, 堀内 浩規, "アドホックネットワークのためのマルチパス・ルーティングの提案," *電子情報通信学会信学技法*, IN2002-125, pp.51-56 2002-11.
- 11) 油田 健太郎, 本田 浩一, 岡崎 直宣, 富田 重幸, "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," *情報処理学会研究報告*, Vol.2004, No.114, pp.63-70, 2004-11.