

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

油田健太郎¹⁾・本田浩一²⁾・岡崎直宣²⁾・富田重幸²⁾

本論文では、アドホックネットワークにおいて複数の経路を構築する階層型複数経路構築手法を提案する。ここでは、あらかじめ決められた領域にノードを対応させ、経路制御を領域内、領域間の2つに階層化することにより、経路構築の際の計算量を減らすことができる。提案方式では、経路構築時にゾーン内の状態を考慮して最短経路を構築することにより、より短い経路を構築できる。また、互いに重複する複数経路を持たないように構築することにより、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。

A Zone-Based Multipath routing for ad hoc network

Kentaro ABURADA, Koichi HONDA, Naonobu OKAZAKI, Shigeyuki TOMITA

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 an eXtended ZHLS (called XZHLS) which generates disjoint paths in global zone level. If a disconnected link is detected in the currently using route, packet transmission is switched to another route.

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。

1) 宮崎大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, University of Miyazaki
2) 宮崎大学工学部
Faculty of Engineering, University of Miyazaki

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ト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探索を行う^{[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、経路探索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]。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探索を行う。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。

従来、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) が提案されている^{[5],[6]}。ZHLSでは、ネットワークを重な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、位置とゾーンIDを知る。ZHLS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。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。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。

しかしながら、ZHLSでは経路探索時にゾーン内ではHop数による最短経路が選ばれるが、あて先ノードの属するゾーンまでの経路は、通過するゾーン数のみで決定しており、ゾーン内の状態を考慮していない。あて先ノードまでのゾーン数が少ない場合でも経由するノード数が多くなってしまいうこともあり、フラットなネットワーク上での最短経路と比べて経路が長くなってしまふ。また、ZHLSでは単一の経路しか構築されない。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し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の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。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^[8-10]。

そこで本論文では、ZHLSを拡張し、経路構築時にゾーン内のトポロジを考慮して最短経路を構築するとともに複数経路構築に対応した拡張ZHLSルーティング方式を提案する。提案方式では、経路構築時にゾーン内のトポロジを考慮することにより、より短い経路を構築することができる。複数経路構築の際には、メイン経路構築時と同様にバックアップ経路もゾーン内の状態を考慮し、構築する。また、複数経路は重複する経路を持たないように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。更に、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、4. 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。5. 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 では、ネットワークを重なりのないゾーンに区切る。各ノードは、GPS を用いることにより、位置と対応するゾーン ID を知る。ZHLS 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、図 2 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。

A ノードレベルクラスタリング

ノードレベルのリンク状態を把握する手順を示す。

- (a) ノード a が近隣の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 a 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 a に返信。
- (c) ノード a は、周囲のノードからリンクレスポ

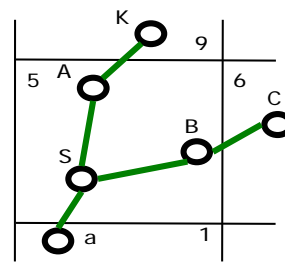


図 1. ノードレベルのネットワーク

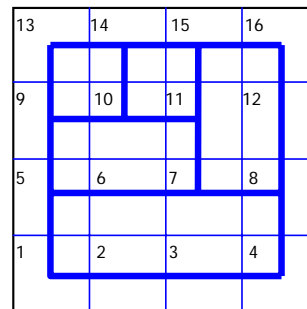


図 2. ゾーンレベルのネットワーク

Node	Node LSP
S	A,B,1
A	S,9
B	S,6

図 3. ゾーン 5 のノードレベルのリンク状態テーブル

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。

(d) ゾーン内の全てのノードが、(a) ~ (c) までの手順を行う。

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 3)、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 4)。この手順を定期的に行うことにより、ノードのリンク状態の発見や更新を行う。

B ゾーンレベルクラスタリング

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 5)、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 6)。ゾーン LSP が更新された場合のみ、この手順を行うことにより、ゾーン間のリンク状態を更新する。

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。

2.2 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 4)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 6)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 4)を用いてルーティ

Destination	Next node
A	A
B	B
1	a
6	B
9	A

図 4 . ノード S のゾーン内ルーティングテーブル

Zone	Zone LSP
1	2,5
2	1,3
.	
.	
15	11,14,16
16	12,15

図 5 . ゾーンレベルのリンク状態テーブル

Destination Zone	Next Zone	Next Node
1		
.		
9	9	A
10	9	A
.		
14	9	A
.		
16		

図 6 . ノード S のゾーン間ルーティングテーブル

ングを行う。

ZHLS では経路構築時にゾーン内では Hop 数による最短経路が選ばれるが、あて先ノードの属するゾーンまでの経路は、通過するゾーン数のみで決定しており、ゾーン内のトポロジを考慮していない。また、あて先ノードまでのゾーン数が少ない場合で

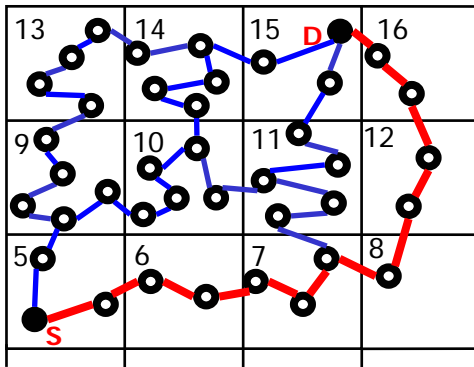


図 7 . ネットワークトポロジ

も経由するノード数が多くなってしまいうこともあり、フラットなネットワーク上での最短経路と比べて経路が長くなってしまふ。ゆえに、より短い経路を求めるためには、通過するゾーン数のみではなく、ゾーン内の状態も考慮し、経路を構築する方が望ましい。また、ZHLS では単一の経路しか構築されない。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し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の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。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。さらに、構築する経路はリンク切断による影響を最小限に抑えるため、互いに相関の低いものが望ましい。

3 . 提案方式

本論文では、ZHLS を拡張し、経路探索時にゾーン内の状態を考慮して最短経路を構築するとともに複数経路構築に対応した拡張 ZHLS ルーティング方式を提案する。

提案方式では、経路構築時にゾーン内の状態を考慮することにより、より短い経路を構築することができる。複数経路構築の際には、メイン経路構築時

Zone	Zone LSP	Hopcount
1		
.		
9	5,10,13	5-10: 1 ,5-13: 3 ,10-13: 4
10	9,11,14	9-11: 4 ,9-14: 3 ,11-14: 1
.		
14	10,13,15	10-13: 4 ,10-15: 3 ,13-15: 1
.		
16	12,15	12-15: 1

図 8 . ゾーンレベルのリンク状態テーブル

と同様にバックアップ経路もゾーン内の状態を考慮して構築する。また、複数経路は重複する経路を持たないように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なく、ただちに経路を切り替えることができる。更に、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。

3.1 拡張 ZHLS ルーティング方式

従来方式では、送信ノードが属するゾーンからあて先ノードが属するゾーンまでのルーティングは経由するゾーン数のみで決定していた。提案方式では、経由するゾーン数とゾーン内部の状態も合わせて考慮し、経路構築を行う。ZHLS では、ゾーン内ルーティングテーブル(図 4)を作成する際には、ノードレベルのリンク状態テーブル(図 3)よりホップ数を元に SPF アルゴリズムを用いて計算を行う。これに対して、提案方式ではこの時に得られるゾーン内での送信ノードからあて先ノードへの最短ホップ数の情報を利用して、あるゾーンと接するゲートウェイ端末から他のゾーンと接するゲートウェイ端末までのホップ数の情報を Hopcount としてゾーンレベルの状態テーブルに追加する。そして、ゾーン間ルーティングテーブルを作成する際に、あて先ゾーンまでに経由するゾーン数と Hopcount を足し合わせた値で評価し、あて先ゾーンまでの経路

表 1 . シミュレーション環境

Number of Nodes	100 nodes
Network	300 × 300 unit
Communication range	40 unit
Layout of nodes	random

表 2 . 最短経路構築結果

方式	LSR	ZHLS			拡張 ZHLS		
		9	16	25	9	16	25
ゾーン数	-						
最短経路	8	8	11	12	8	9	10

を決定することによって、ゾーン内のルーティングテーブルとともにゾーン間ルーティングテーブルを作成する。

図 7 で示すネットワークトポロジに対して、この手法で構築されるゾーンレベルの状態を図 8 に示す。以下に図 7 の送信ノード S から先ノード D までの最短経路を構築する例を示す。提案方式では、送信ノード S から先ノード D までのゾーン数のホップ数、Hopcount を足し合わせてもっともコストの少ない経路を選ぶ。図 7 の例では、5 6 7 8 12 16 15 のゾーンを通るルートが、12 ホップで最小となる。すなわち、ゾーン数のホップ数 6 とそれぞれの Hopcount を足し合わせた値 5、送信ノードからゾーン 6 と接するゲートウェイノードまでのホップ数 1 の合計 12 ホップである。

このように提案方式では、ゾーン内部のトポロジも考慮して経路を構築するため、先ノードまでのゾーン数が少ないにもかかわらず経由するノード数が多くなってしまおうような経路の構築を抑制でき、より短い経路を構築することができる。

3.2 複数経路構築手法

ここでは、複数経路を構築するため、ZHLS ルーティング方式を拡張する。まず、3.1 節で示した方法を用いて最短経路を構築する。これをメイン経路

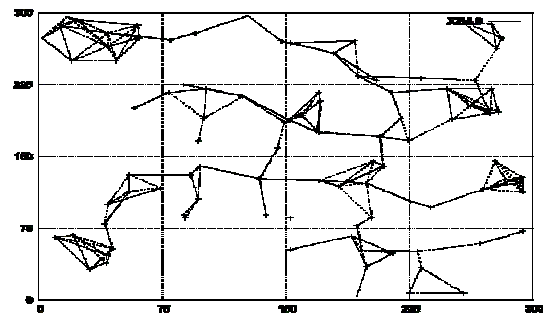


図 9 . ゾーン数 16 の場合の最短経路

と呼ぶ。この時、ゲートウェイノードは S から D へのメイン経路に含まれるゾーンにフラグを付けたゾーン LSP をネットワーク全体へブロードキャストする。これを受信した各ノードは、ゾーンレベルのリンク状態テーブルを更新する。次に、更新されたゾーンレベルのリンク状態テーブルに基づき、メイン経路に含まれないゾーンから構成される経路のうち最短の経路をバックアップ経路として構築する。以下、同様にしてメイン経路やそれまでに構築されたバックアップ経路に含まれないゾーンにより構成される経路を構築する。これにより、リンクを共有しない複数の経路が構築される。このことにより、メイン経路が切断された場合にも切断箇所を特定する必要なく、ただちにバックアップ経路の 1 つに切り替えることができる。同時に経路の切り替えが起きたことを示すゾーン LSP をネットワーク全体へブロードキャストし、各ノードはゾーンレベルのリンク状態テーブルを更新する。

4 . 評価

本章では、構築される経路の長さ、ネットワークトポロジの作成にかかる通信のオーバーヘッド、経路構築にかかる計算量の観点から、階層化を行わないフラットなネットワーク (LSR : Link State Routing)、従来方式である ZHLS、拡張 ZHLS (XZHLS) の 3 つの方式の比較を行った。

4.1 最短経路構築

表 1 にシミュレーションの環境を示す。一辺が 300unit のネットワークに 100 台のノードをランダ

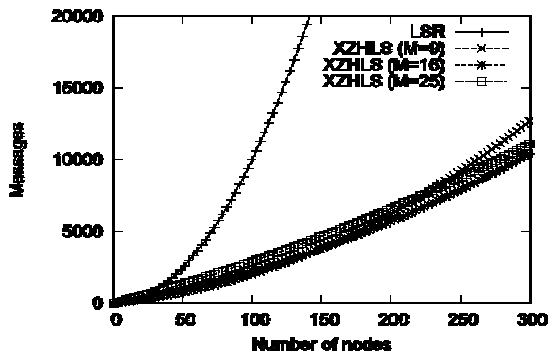


図 10 . ネットワークトポロジ作成のオーバーヘッド

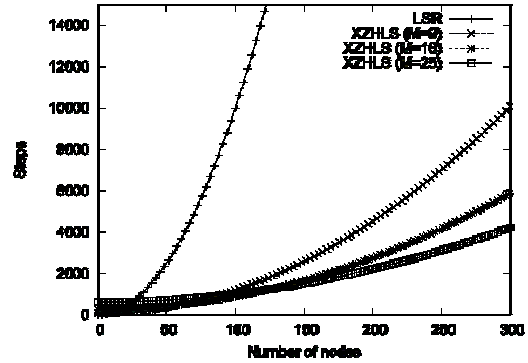


図 12 . 経路構築にかかる計算量

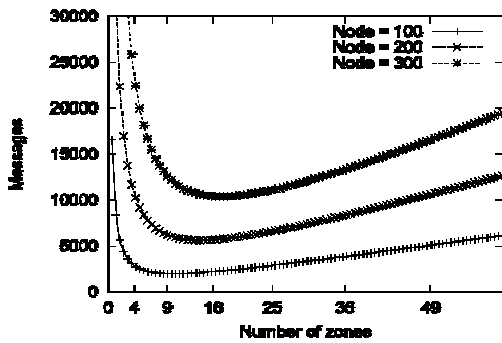


図 11 . 異なるノード数でのゾーン数の最適解

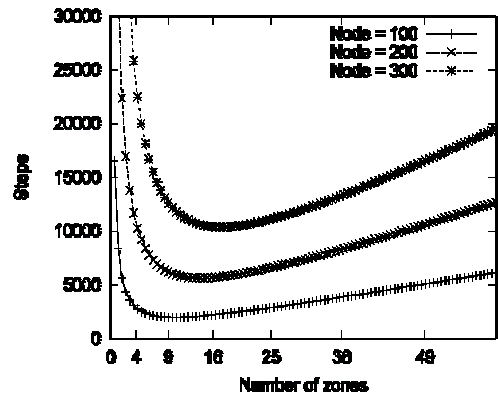


図 13 . 異なるノード数でのゾーン数の最適解

ムに配置し、ZHLs, 拡張 ZHLs では、ゾーン数を 9 から 25 へと値を変えて、シミュレーションを行った。拡張 ZHLs の効果が最も良く効果が表れた場合の結果を表 2 に示す。図 9 は、この時のゾーン数が 16 の場合の最短経路を示す。表 2 より、提案方式の効果はゾーン数に依存すると考えられる。

4.2 通信のオーバーヘッド

LSR では、ノードはひとつの LSP を作成し、それを他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、

$$S_{LSR} = N^2 \text{ messages}$$

となる。それに対して、ZHLs, 拡張 ZHLs では、ネットワークを M 個のゾーンに分割するのでノード 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、

$$S_{ZHLs} = N^2 / M + NM$$

となる。図 10 に LSR, 拡張 ZHLs (ゾーン数がそれぞれ 9, 16, 25 個) の場合のネットワークトポロジ作成のオーバーヘッドを示す。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、メッセージ量を抑えることができると考えられる。さらに、ゾーン数を変化させた場合のメッセージ数を図 11 示す。同図より、メッセージ数を最小にするゾーン数の最適値がノード数によって決まることが分かる。

4.3 経路構築の計算量

LSR 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, 拡張 ZHLs 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, $C_{\text{node}}=O(N^2/M)$ 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, $C_{\text{zone}}=O(M^2)$ となり, 計算量の合計 C_{ZHLS} は,

$$C_{\text{ZHLS}}=O((N^2/M) + M^2)$$

となる. 図 12 に, LSR, 拡張 ZHLS (ゾーン数がそれぞれ, 9, 16, 25 個) の場合の経路構築のための計算量を示す. 同図より, 最短経路を実用的なパフォーマンスで使用するためには, ネットワークの階層化が非常に効果的であることが分かる. さらに, ゾーン数を変化させた場合の計算量を図 13 に示す. 同図より, 通信のオーバーヘッドと同様に計算量を最小にするゾーン数の最適値がノード数によって決まることが分かる.

5. まとめ

本論文では, アドホックネットワークにおけるロバストな経路を効率良く構築することを目的とした拡張 ZHLS ルーティング方式を提案した. 提案方式は, ゾーン内のトポロジを考慮して経路を構築することを特徴としている. 従来方式である ZHLS に比べて, より短い経路を構築できる例についてシミュレーションの結果を示した. また, ゾーンレベルで経路を構築することにより, ネットワークを階層化しない場合に比べて大幅に計算量を減らすことができることを, 数値計算のモデルに基づく評価を行うことにより示した. さらに, 重複する経路を持たないように複数経路を構築することにより, 通信中の経路が切断された場合に, 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と考えられる.

今後の課題としては, ノードが移動する場合を考慮した複数経路構築手法をシミュレーションにより評価し, 経路の安定性に関する提案方式の有効性を示すことなどがある.

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, pp1752-1756, 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, 桧垣 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, 桧垣 博章, "MANNET 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.