

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評価

油田 健太郎¹ 守田 可南子² 岡崎 直宣² 富田 重幸² 朴 美娘³

1 熊本県立大学総合管理学部 〒862-8502 熊本市月出 3-1-100

2 宮崎大学工学部 〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1

3 三菱電機(株) 情報技術総合研究所 〒247-8501 鎌倉市大船 5-1-1

E-mail: aburada@pu-kumamoto.ac.jp

あらまし 本稿では、アドホックネットワーク上においてロバストな通信手法を実現するために、複数の経路を構築する新たな手法を提案し、その評価結果について報告する。提案手法では、あらかじめ決められた領域にノードを対応させ、経路制御を領域内および領域間の2つに階層化する。そして、階層化された上位の層で重複のない複数の経路を構築することにより、通信リンクが切断された場合においても、切断されたリンクを特定することなく、ただちに経路を切り替えることができる。また提案手法では、複数経路を構築する場合に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。シミュレーションによる評価を行い、従来手法に比べ経路制御情報量や経路構築にかかる計算量の増加を抑えつつ、ノードの移動速度が速くかつルーティングテーブルの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す。

キーワード アドホックネットワーク, マルチパス, ロバストルーティング

Evaluation of Robust Zone-based Hierarchical Routing Method for Ad Hoc Networks

Kentaro ABURADA¹ Kanako MORITA² Naonobu OKAZAKI² Shigeyuki TOMITA²
and Mi Rang PARK³

1 Prefectural University of Kumamoto, Kumamoto, 862-8502 JAPAN

2 University of Miyazaki, Miyazaki, 889-2192 JAPAN

3 Mitsubishi Electric Corporation, Kamakura, 247-8501 JAPAN

E-mail: aburada@pu-kumamoto.ac.jp

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, 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.

Keyword ad hoc networks, multi-path, robust routing

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

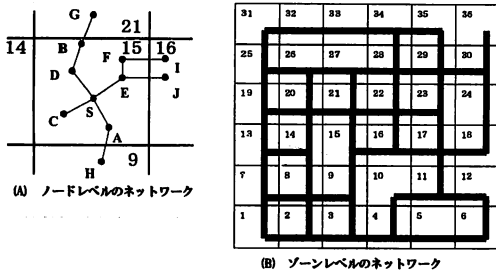


図 1. ZHLS ルーティング方式におけるネットワーク構成

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としないため、経路制御情報量は小さくなるが、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 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^[4]。しかしながら、ZHLS ルーティング方式は、単一の経路のみ構築されるルーティングプロトコルであり、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問題がある。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^[6]。さらに、一定の範囲で通信障害が起こる場合を想定し、複数の経路でリンク切断が同時に起こることによる経路の信頼性の低下を抑えることが望ましい。

本稿では、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-ZHLS (Multiple-Route

Zone-based Hierarchical Source Routing) ルーティング方式を提案する。さらに、シミュレーションによりパケット到着率について評価を行い、提案方式の有効性を示す。

以下、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. でシミュレーションによる評価を行う。5. はまとめと今後の課題である。

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 ルーティングでは、ネットワークを重なら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 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. ルーティングテーブル

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。

(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。

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。

□

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。

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

図 2. ゾーン 15 のノードレベルのリンク状態テーブル

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

図 4. ゾーンレベルのリンク状態テーブル

(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。

- 1) 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。
- 2) 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た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。

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

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

2.2. ZHLS ルーティング方式の問題点

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. 提案方式

本稿では、アドホックネットワーク上においてもロバスト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、一定の範囲で通信障害が起こった場合でも、複数の経路でリンク切断が同時に起こることによる経路の信頼性の低下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、受信ノードの組み合わせ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。

なお、提案方式による経路構築方法については、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。

以下、3.2 節に複数経路の構築手順、3.3 節に複数経路の再構築手順について述べる。

3. 2. 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]

[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

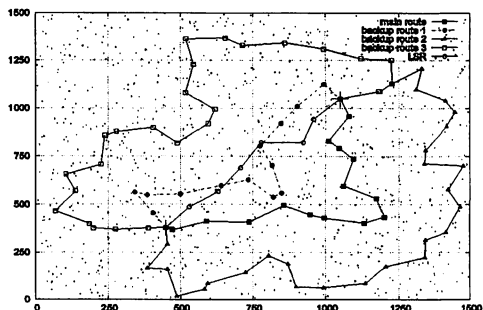


図 6. MR-ZHSR ルーティング方式による複数経路構築の例

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。

図 6 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。

3. 3. 複数経路の再構築

3.2 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 6)。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

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. 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。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。

4.1. シミュレーションモデル

本シミュレーションでは, 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。シミュレーションでは, ノードの移動にかかる時間を 1 サイクルと定義し, 100 サイクルを 1 回とみなし, 100 回の平均値を求めた。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, 3.3節で示した複数経路の再構築手法は未実装である。

4.2. シミュレーション結果と考察

図 7, 図 8 に通信半径を, $200, 150$ [m]とした場合の

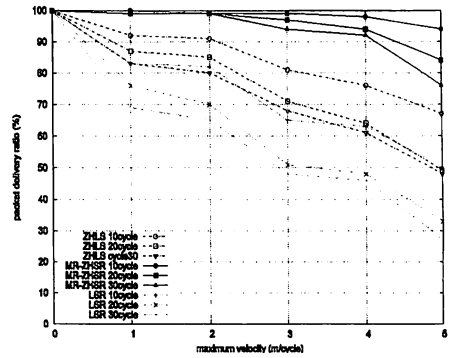


図 7. 通信半径 200[m]の場合のパケット到着率

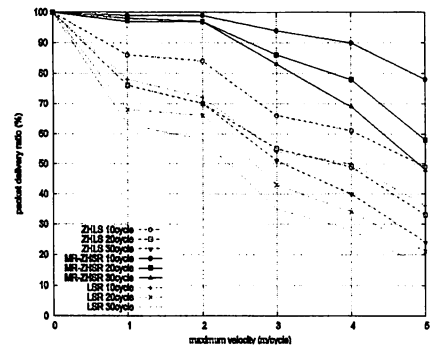


図 8. 通信半径 150[m]の場合のパケット到着率

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。

まず, 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, 同じテーブル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。

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。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。

5. まとめ

本稿では、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。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。

今後は、通信のトラフィック量、経路の切り替えにかかる時間などの評価や、一定の範囲に通信障害が発生した場合などの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。

文 献

- [1]C. Perkins, E. Belding-Royer and S. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing" , RFC3261, July 2003.
- [2]Josh Broch and David A. Maltz. "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks" , Internet Draft, July 2004.
- [3]Z.J. Haas, "The zone routing protocol (ZRP) for ad hoc networks", Internet Draft, July 2002.
- [4]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.
- [5]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.
- [6]油田 健太郎, 岡崎 直宣, 富田 重幸, 朴 美娘, "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", DICO 2005, Vol.2005, No.6, pp.317-320, July 2005.