

アドホックネットワークにおけるマルチキャストルーティングの高信頼化

鈴木 能 佐藤文明†

† 静岡大学院情報学研究科

概要: トポロジが頻繁に、かつ急速に変化し、電源が制限されるというような特徴をもったアドホックネットワークでは、信頼性について多くの課題が残されている。今回提案するのは、アドホックマルチキャストルーティングプロトコルの一つである ODMRP(On-Demand Multicast Routing Protocol) の拡張である。この ODMRP は、フォワーディンググループ (FG) というノード群を構成し、データの配送を行う。提案方式では、フォワーディンググループ間の接続が切れた場合に、一時的にそのパケットの転送を手助けするサポートグループの概念を追加する。これによって、経路の再構築を行わず、局所的にリンクの切断を復旧させることが可能となり、経路の信頼性を向上させることができる。本稿では、サポートグループのノードが、フォワーディンググループのノードになったとき、新たにそのサポートグループを形成し、信頼度を維持する方式をも提案し、シミュレーションによって評価した。

Reliable Multicast Routing for Ad-Hoc Networks

Chikara Suzuki Fumiaki Sato †

† Graduate School of Information, Shizuoka University

Abstract: Ad-hoc networks have the characteristics of dynamic topology and many applications on ad-hoc networks tend to require group communication capabilities. Previous proposed multicast mechanisms on mobile ad-hoc networks build multicast infrastructures like the tree or mesh for the group communication and these infrastructures may cause significant overhead especially in a highly dynamic mobile ad-hoc network environment. Therefore, in this paper, we propose a new multicast routing mechanism supporting local reconfiguration of the routing path. In our mechanism, we introduce the supporting group to detect the path disconnection and recover the broken path. As a result, we could achieve better performance in terms of the reliability and the control overhead.

1 はじめに

近年、モバイル端末 (ノート PC, 携帯電話など) の普及と、無線通信の発達により、アドホックネットワーク [1] という、端末同士が即席に構築できるネットワークが研究されている。トポロジが頻繁に、かつ急速に変化し、電源が制限されるというような特徴をもったアドホックネットワークでは、信頼性について多くの課題が残されている。

本研究では、その信頼性について着目する。今回提案するのは、アドホックマルチキャストルーティングプロトコルの一つである ODMRP(On-Demand Multicast Routing Protocol)[2][3][4] の拡張である。この ODMRP は、フォワーディンググループというメッシュタイプの配送経路を構成し、比較的信頼性が高いプロトコルであるが、ノードの移動速度や密度によっては、頻繁にリンクが切れることになる。

提案方式では、フォワーディンググループ (FG) 間の接続が切れた場合に、一時的にそのパケットのフォワードを手助けするサポートグループの概念を追加する。サポートグループのノードは、リンクの切断を検地すると、フォワーディンググループに代ってパケットの転送を試みる。もし、転送ができたとき、サポートグループのノードは新

しく、フォワーディンググループのノードとして動作を続ける。これによって、経路の再構築を行わず、局所的にリンクの切断を復旧させることが可能となり、経路の信頼性を向上させることができる。

本稿では、サポートグループのノードが、フォワーディンググループのノードになったとき、新たにそのサポートグループを形成し、信頼度を維持する方式をも提案する。

2 ODMRP

ODMRP とは従来の本構造ではなく、メッシュベースのマルチキャスト構造であり、フォワーディンググループ (FG) の概念を使用したマルチキャスト方式である。これにより、動的に経路を構築し、マルチキャストグループメンバを管理できる。

FG とは、マルチキャストパケット (MC パケット) をフォワーディングする際に参加するノード群である。FG ノードは、送信者/受信者間の最短経路にいるノードが選出される。選択された FG ノードだけがマルチキャストのためのデータ配送を行う。FG のメンバと、マルチキャスト

トメンバは、送信者の要求によって構築され更新されている。送信者はデータにメンバを告知するパケットを付加してブロードキャストする。このパケットは"Join_Query"と呼ばれ、経路の更新とメンバ情報の再編成のために定期的にブロードキャストされる。Join_Queryを受け取ったノードは、上位ノードのアドレスをルーティングテーブル内の送信者のネクストノードとして挿入する。TTLが0より大きければ、それに応じた特定のフィールドを更新し、再びブロードキャストする。

Join_Query が受信者に到着すると、"Join_Reply"が作られる。Join_Reply のフォワーディングプロセスの例として図1を考える。ここでS1とS2は送信者であり、ノードR1とR2は受信者である。R1はX1を通してS1へ、X2を通してS2へJoin_Replyを送り、R2はX2を通してS1とS2の両方へJoin_Replyを送る。R1がネイバーへJoin_Replyを送信すると、X1はR1から受け取ったJoin_Replyの中に自分のIDと一致するネクストノードIDエントリが存在するので、フォワーディンググループフラグ(FG_FLAG)をセットし、Join_Replyを発行する。一方、ノードX2はR2から受け取ったJoin_ReplyによりFG_FLAGをセットし、Join_Replyを発行する。X2はこのあとR1からJoin_Replyを受け取ってもJoin_Replyをブロードキャストしない。これは2番目に到着したパケットは、新しい送信者の情報が含まれていないからである。またX3はR2からのJoin_Replyを受け取るが、経路上にいないのでパケットを捨てる。

このようなグループ確立と経路構築のプロセスの後で、送信者は決定した経路を用いて受信者へパケットをマルチキャストする。

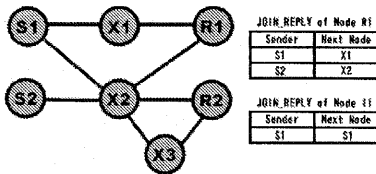


図1: マルチキャストグループとルーティングテーブル

3 サポートグループによるルーティングの高信頼化方式

今回提案するのは前述したFGの概念に、サポートグループ(SG)の概念を持たせるプロトコル方式である。SGとは、FG間の接続が切れたときに、代ってパケットをフォワーディングするノードのグループである。このSG確立のプロセスは、FG確立のプロセスを少し変更することでできる。

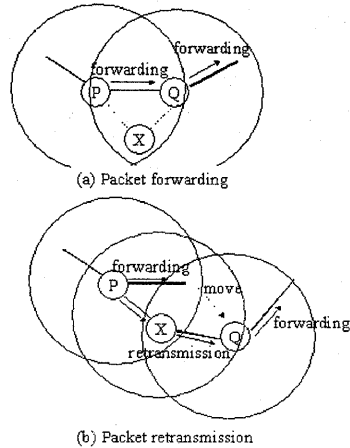


図2: サポートグループの働き

3.1 サポートグループの確立

ODMRPでは、Join_Replyを受け取ったノードは、自分のIDと一致するネクストノードIDエントリが存在するかを確かめる。提案方式では、さらに自分のルーティングテーブルの送信者へのIDと一致するネクストノードIDエントリが存在するかを調べる。ネクストノードIDが自分と異なっており、送信者IDが自分と一致したノードは自分がFGの一員ではなく、SGの一員であると理解し、SG_FLAG(サポートグループフラグ)をセットし、受け取ったJoin_Replyは捨てる。図1を考えるとX3がSGメンバになる。このプロセスがSGを確立するプロセスである。

SGメンバには上位ノードと下位ノードがある。図1では、SGであるX3の上位ノードはX2、下位ノードはR2となる。MCパケットがS1、またはS2から送信されると、X3はX2からそのパケットを受け取り、R2からは受信したというACKを受け取る。しかしX2とR2間の接続が切れたときにはR2がパケットを受信できないので、R2からのACKを受け取れないこととなる。その場合に、X3は隣接ノードにMCパケットを送信し、R2はMCパケットを受け取ることができる。これがSGの働きである。

3.2 サポートグループによる再送

フォワーディンググループ間の接続が切れた時を想定する。この場合、サポートグループが転送の手助けをする。サポートグループには上位ノードと下位ノードが必ず存在する。図2で考えると、Xがサポートグループメンバで、Pが上位ノード、Qが下位ノードとなる。データパケットが送信者から流れると、Xは上位ノードのPからデータパケットを受け取り、Qからは下位ノードに転送した時に送られてくるパケットを間接的に受信する。XはQからの転送パケットが間接的に受信できるまで、そのデータパケットを保管しておく。ある一定の時間保持してQからの転

送パケットが帰ってこなかったら、PQ間の接続が切れたことを理解し、再送パケットをQに送る。この動作によって部分的にデータの再送処理を行う。

その後、XはQからの再送パケットの転送が間接的に受信できるのを確認し、その中にフォワーディンググループになるべき情報としてXの識別子が入っていたら、Xはフォワーディンググループになる。そして、上位ノードPと下位ノードQの間に新しくサポートグループを見つけるためにSG_CONSと呼ばれる制御パケットを隣接ノードに送信する。SG_CONSを受け取った上位ノード、または下位ノードは、SG_CONS.Replyを返す。これによって、このパケットを受信できたフォワーディンググループ以外のノードは新たにSG_FLAGをセットして、サポートグループのメンバになる。

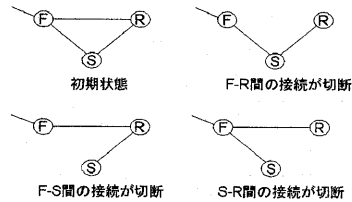


図 3: サポートグループ

プのセットと、マルチキャストデータパケット処理の二つである。

3.3 サポートグループからフォワーディンググループへの移籍, 脱退

実際のネットワークを考えた場合に、状況によってサポートグループは処理方法を変えなければいけない。図3のようにいくつかの状況に分けられるからである。ここで、ノードFはフォワーディンググループ、ノードSはサポートグループ、ノードRは受信者である。場合分けされたときを、まず図3を例として以下に示す。

F-R間の接続が切断 これがサポートグループの働くときの状態である。サポートグループはノードFからデータパケットを受け取るが、ノードRからのackは受け取ることが出来ない。この場合、ノードSはデータパケットを通信可能範囲にあるノード群に送信し、受信者から上位ノードとして指定する情報を含むackが帰ってきたのならFG_FLAGをセットする。

F-S間の接続が切断 この場合、データパケットはノードSにまったく届かない。従って、ノードSはある程度のタイムアウト時間を決めておいて、タイムアウト処理を実行しSG_FLAGを0に戻し、サポートグループから脱退する。または、タイムアウト前でも、ノードRからのackだけが到着した場合はSG_FLAGを0にする。

S-R間の接続は切断 この場合、ノードFからのデータパケットは届くがackが帰ってこない。従って、サポートグループは通信可能範囲にあるノード群にデータパケットをブロードキャストする。しかし、ノードRからのackは帰ってこないで適当な時間にタイムアウト処理を行い、サポートグループを脱退する。

4 提案方式の動作

本節では、提案方式の動作について説明する。まず、提案方式で使う制御パケットの構成について説明する。次に、提案方式の動作を説明する。プロトコルの動作として大きく分けると、フォワーディンググループとサポートグループ

4.1 制御パケットの構成

4.1.1 Join_Query パケットのヘッダ

以下に JOIN_Query パケットのヘッダを示す。"type"は、パケットの形式であり JOIN_Query は"01"で8ビット。"Sequence Number"は、送信者によって割り当てられた識別子で32ビット。"Previous Hop IP Address"は、このパケットを処理した最新のノードのIPアドレスである。

type	Reserved	Time To Live	Hop Count
Multicast Group IP Address			
Sequence Number			
Source IP Address			
Previous Hop IP Address			

4.1.2 Join_Reply パケットのヘッダ

以下に JOIN_Reply パケットのヘッダを示す。"type"は、JOIN_Reply は"02"で8ビット。"F"はフォワーディンググループフラグで、フラグはパケットがフォワーディンググループノードによって送信されたときにセットされる。これは1ビットである。"R"は受信者によって送信されて時にセットするフラグである。これも1ビットである。"Next Hop IP Address"は、このパケットがターゲットとしている次のノードのIPアドレスで、32ビットである。

type	Count	R	F	Reserved
Multicast Group IP Address				
Previous Hop IP Address				
Sequence Number				
Sender IP Address				
Next Hop IP Address				

4.1.3 SG_CONS パケットのヘッダ

以下に、SG_CONS パケットのヘッダを示す。"type"は、パケットの形式であり SG_CONS は"03"。Upper IP Addressには、上位ノードのアドレスをセットし、Bottom IP

Address には下位ノードのアドレスをセットする。基本的に TTL は 1 とする。Previous Hop IP Address には、自身のアドレスをセットする。

type	Reserved	Time To Live	Hop Count
Multicast Group IP Address			
Sequence Number			
Previous Hop IP Address			
Upper IP Address			
Bottom IP Address			

4.1.4 SG_CONS_Reply パケットのヘッダ

以下に、SG_CONS パケットのヘッダを示す。"type" は、パケットの形式であり SG_CONS は "04"。Previous Hop IP Address には、自身のアドレスをセットする。

type	Reserved
Multicast Group IP Address	
Sequence Number	
Previous Hop IP Address	
Target IP Address	

4.2 グループ設定

Join_Query と Join_Reply の 2 つの制御パケットでグループの設定が行われる。また、SG_CONS によってサポートグループの設定が行われる。制御パケットの過程を以下に示す。

4.2.1 Join_Query の生成

送信者は送信すべきデータはあるが、その経路がわからない場合 "Join_Query" パケットを発行する。従って、type フィールドに 01 をセットする。TTL は、ネットワークサイズとネットワーク規模にあわせて調節する必要がある。Sequence Number は重ならないように、十分に大きくする。Hop Count は最初は 0 にセットする。送信者は Source IP Address フィールドと Previous Hop IP Address フィールドに自分の IP アドレスをセットし、ブロードキャストする。

4.2.2 Join_Query 受信時の処理

ノードが Join_Query を受け取った時、以下の処理を行う。

- (1) 重複しているかどうかを、メッセージキャッシュのエントリと Source IP Address、Sequence Number の比較によってチェックする。重複していれば、そのパケットを捨て処理を終了する。
- (2) 重複していなければ、受け取ったパケットの情報をメッセージキャッシュのエントリと、ルーティングテーブルのエントリの挿入/更新を行う。

- (3) もし、ノードがマルチキャストグループのメンバーであるなら Join_Reply を発行する。
- (4) Hop Count を 1 増やし、Time To Live を 1 減らす。
- (5) TTL の値が 0 以下になったら、パケットを捨てる。
- (6) TTL の値が 0 より大きければ、ノードの IP アドレスを Previous Hop IP Address フィールドにセットし、ブロードキャストする。

4.2.3 Join_Reply の生成

マルチキャスト受信者は、経路を選択した後で "Join_Reply" を送信する。Sender IP Address フィールドと、Next Hop IP Address フィールドには Join_Query から受け取った情報 (Previous Hop IP Address) をセットする。

4.2.4 Join_Reply 受信時の処理

ノードが Join_Reply を受け取った時、以下の処理を行う。

- (1) 重複しているかどうかを、メッセージキャッシュのエントリと Sequence Number の比較によってチェックする。重複していれば、そのパケットを捨て処理を終了する。
- (2) Sender IP Address フィールドと、Next Hop IP Address フィールドのエントリと、ノードの IP アドレスと一致するかを調べる。
- (3) 一致したら、FG_FLAG をセットし、自分は Join_Reply を発行する。このときの Sender IP Address フィールドと、Next Hop IP Address フィールドは自身のルーティングテーブルを参照し、セットする。
- (4) Sender IP Address フィールドと、Next Hop IP Address フィールドのエントリと、ノードのルーティングテーブルのエントリとが一致するかを調べる。
- (5) 一致したら、SG_FLAG をセットし、そのパケットを捨て処理を終了する。
- (6) Join_Reply を通信可能範囲にあるノード群へブロードキャストする。

4.2.5 SG_CONS の生成

サポートグループがフォワーディンググループに変わる時は SG_CONS を生成し、送信することで、サポートグループの再発見を行うことができる。Upper IP Address と Bottom IP Address には、上位ノードと下位ノードをセットする。

4.2.6 SG_CONS 受信時の処理

ノードが SG_CONS を受け取った時、以下の処理を行う。

- (1) Multicast Group IP Address フィールドと, Upper IP Address フィールド, または Bottom IP Address フィールドのエントリと, 自身のノードの IP アドレスと一致するかを調べる.
- (2) 一致したら, SG_CONS_Reply を返す.
- (3) 一致しなかった場合, Previous HOP IP Address, Upper IP Address と Bottom IP Address をキャッシュに 3 つのアドレスを挿入する.
- (4) 一定時間待つ, キャッシュしたものと同一データパケット, または受信者からの ack を受信できない場合はそのデータパケットを通信可能範囲にあるノード群に送信する.
- (5) 再度, 一定時間待つ, 上位ノードとして指定する情報の入ったデータパケット, または受信者からの ack を待つ. 受信したならその SG は FG.FLAG をセットし, SG_CONS を送信し, 新しいサポートグループを発見する.

4.2.7 SG_CONS_Reply 受信時の処理

ノードが SG_CONS_Reply を受け取った時, SG_CONS を受け取ったときにキャッシュした Previous HOP IP Address と Target IP Address の比較し, 一致したら SG_FLAG をセットしサポートグループになる.

4.3 マルチキャストデータパケット処理

マルチキャストデータパケットの処理を各ノードの種類にわけて以下に説明する.

4.3.1 マルチキャスト送信者

マルチキャスト送信者は, 送るべきデータパケットを持っていれば常にデータを送信する. 送信者が送ったデータパケットが戻ってきたらそのパケットは捨てる.

4.3.2 マルチキャスト受信者

マルチキャスト受信者はデータパケットを受け取ると, まず重複しているかを調べる. 重複していなかったら通信可能範囲にあるノード群に ack をブロードキャストする. 重複していたら何もしないでデータパケットを捨てる.

4.3.3 フォワーディンググループメンバ

フォワーディンググループメンバはデータパケットを受け取ると, まず重複しているかを調べる. 重複していなかったらデータパケットそのまま通信可能範囲にあるノード群にブロードキャストする. 重複していたら何もしないでデータパケットを捨てる.

4.3.4 サポートグループメンバ

- (1) タイムアウト処理. 一定時間データパケットが送られてこない場合は SG_FLAG を下げる.
- (2) 送信されてきたデータパケットをキャッシュに保存する.
- (3) キャッシュしたものと同一データパケットを受け取るか, 受信者からの ack を受信したらそのデータパケットは捨てる.

4.3.5 その他のノード

データパケットが自分にまったく関係のないものならば, そのパケットを捨てる.

5 シミュレーション

5.1 シミュレーション概要

従来方式である ODMRP と, 提案方式の比較をシミュレーションで行い, 評価する. 基本的に, グループ構築のオーバーヘッドは従来方式も, 提案方式も同じである. ここで比較するのは, いくつかのパラメータを変化させてパケット到達率を評価する.

シミュレーションは距離 1000m × 1000m のフィールドを想定して, そこに N 個のノードをランダムに配置させた. ノードの中から適当な数の送信者と受信者を抽出し, グループの構築と, マルチキャストパケットの配送を行う. これにより, どのくらいの割合でマルチキャストパケットが到達するのかが 100000 秒で評価した.

パラメータとして, データが 1 ホップするための時間を平均 0.01 秒, 各ノードのデータ処理時間を平均 0.01 秒とする. マルチキャストパケットの送信時間間隔は平均 0.1 秒, 各ノードの通信可能距離を 200m とする.

また, 各ノードの移動モデルは次のように設定した. T 秒間だけある一定速度 S を平均とする速さで方向 θ (8 方向) に移動する. T 秒間経過するとノードは, 新たな目的地方向 θ をランダムで決めるか, もしくはその場に留まるかを決定する. 移動するのであれば T 秒間その方向に, ある一定速度 S を平均とする速さで移動し, 止まるのであれば T 秒間その場に留まる. 今回のシミュレーションでは時間 T は 5 秒に設定した.

5.2 評価

提案方式と, 従来方式の ODMRP のグループ更新時間間隔変化におけるデータパケット到着率の比較を行った. ここでのパラメータとして, ノードの数 N は 30 個で, そのうちマルチキャスト送信者を 2 個, マルチキャスト受信者を 5 個とした. ノードの平均速度 S は 10km/h である. 結果のグラフを図 4 に示す.

ODMRP は Join_Query の送信間隔が 1.5 秒以上になると, ノードの平均速度がゆったりとしているこのモデル

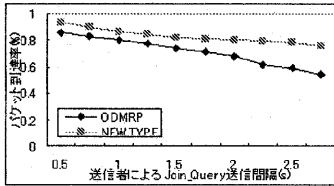


図 4: Join_Query 発送間隔におけるパケット到達率の比較

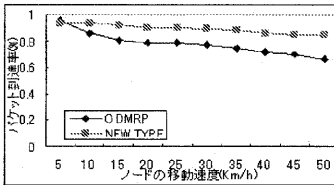


図 5: ノードの移動速度におけるパケット到達率の比較

でもパケットの到達率が落ちているのがわかる。提案方式では、パケット到達率はもちろん落ちているが、ODMRP程ではない。つまり、ある程度のパケットの到達率は保証している。一回の Join_Query を送るごとにグループ更新のためのオーバーヘッドはかなりのものである。つまり、Join_Query の発送間隔が少しでも長いとグループ更新のオーバーヘッドは何十分の一におさまる。提案方式では、Join_Query 発送間隔を長くしてもある程度のパケット到達率は保証しているのでかなりのオーバーヘッド減少が見込める。

次に提案方式と、従来方式の ODMRP のノードの移動速度におけるデータパケット到着率の比較を行った(図 5)。ここでパラメータとして、ノードの数 N は 25 個で、そのうちマルチキャスト送信者を 2 個、マルチキャスト受信者を 5 個とした。

この結果から提案方式は ODMRP よりも、パケット到達率が常に平均的な割合で高いことがわかる。また、ほとんどノードが動かないようなモデルでは、やはりパケットの到達率が高い。提案方式では、パケットの到達率は 9 割以上の到達率を示していた。ODMRP は、従来インターネット (Mbone) で使用されているプロトコルであるために、ノードがゆっくり動くようなネットワークでは、かなりパケット到達率が高い。しかし、提案方式はそれ以上にパケット到達率が高い。ノードの移動速度が上がると、提案方式は ODMRP よりもパケット到達率は常に高いが、サポートグループのためのオーバーヘッドが気になる。移動速度が上がるとノード間の接続が切しやすくなり、サポートグループの働きも増えるが、サポートグループと下位ノードの接続も切断されることが多くなる。しかし、この状況を考えてもサポートグループの上位ノードと下位ノード間の接続が切れるより、サポートグループと下位

ノードが切れる状況のほうが圧倒的に多いので大きな問題にはならないといえる。

6 まとめ

本稿では、アドホックネットワークにおけるプロトコルの信頼性について着目する。今回提案するのは、アドホックマルチキャストルーティングプロトコルの一つである ODMRP の拡張である。ODMRP は、従来の木構造ではなく、メッシュベースのマルチキャスト構造であり、フォワーディンググループの概念を使用する。このプロトコルは、マルチキャストグループ内に送信者が少ないとき、メッシュ形成がまばらになり、端末の移動性が高い時には非常に脆い。この場合はメッシュを形成するためのオーバーヘッドが非常に大きい。この対応策・機能拡張として、フォワーディンググループ間の接続が切れた場合に、一時的にそのパケットのフォワードを手助けするサポートグループの概念を付け加える。このサポートグループの導入により、プロトコルの高信頼性を計る。このサポートグループ導入によるオーバーヘッドは受信者の数にもよるが非常に少ない。この少量のオーバーヘッドで高信頼化できるのはアドホックネットワークにとって非常に有利である。

シミュレーション結果より、ODMRP 以上のパケット到達率は確認された。ODMRP 程度の到達率を目指すならば、グループ更新のためのオーバーヘッドを大幅に減らすことが可能である。また、ノードの移動速度が上がってもある程度のパケット到達率は保障する。つまり、動的なネットワークにも対応することが確認できた。また、グループ内のノードが密になれば 100%近いパケット到達率が見込める。従って、サポートグループの導入により、アドホックネットワークにおけるマルチキャストの高信頼化は見込めるといえる。

今後の課題としては、まず更なる高信頼化を計るため再送処理の導入を行う。他に、タイムアウト時間のパラメータなどの評価を行う。また、更に詳細な設計を行い実装し、評価する。

参考文献

- [1] David A. Maltz, Josh Broch "Wireless Ad Hoc Networking Protocols", Carnegie Mellon University, August 1999.
- [2] Sung JU LEE, William Su, Matio Gerla "On-Demand Multicast Routing Protocol for Ad Hoc Networks", INTERNET-DRAFT, January 2000.
- [3] <http://citeseer.nj.nec.com/bae00unicast.html>, "Unicast Performance Analysis of the ODMRP in a Mobile Ad hoc Network Testbed"
- [4] <http://www.cs.hut.fi/mart/mail/manet/1999/0109.html>, Internet-Drafts@ietf.org