

最短木による多対多通信を実現するアドホックネットワーク用 マルチキャストルーティングプロトコルに関する評価

小坂 努[†] 加藤 聡彦[†] 伊藤 秀一[†] 浦野 義頼^{††}

[†] 電気通信大学 大学院情報システム学研究科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

^{††} 早稲田大学 大学院国際情報通信研究科 〒169-0051 東京都新宿区西早稲田 1-3-10

E-mail: [†]{pink,kato,itoh}@net.is.uec.ac.jp, ^{††}urano@waseda.jp

あらまし 近年, アドホックネットワークが注目されており, ユニキャストルーティングに加え, マルチキャスト用のルーティングプロトコルの検討も活発に行われている. アドホックネットワークではインターネットに比べて規模が小さく, また無線リンクの資源を有効活用する必要があることから, 送信者ごとの最短木を用いた方式が適していると考えられる. 本稿では, 最短木の構築を効率的に行い, Broadcast & Prune や動的な Join などの Dense Mode の動作を保証するマルチキャストルーティングプロトコルを設計し, ネットワークシミュレータを用いて, 制御メッセージ数とデータ到達率の観点から, 提案方式と ODMRP との比較を行った結果について述べる.

キーワード アドホックネットワーク, マルチキャスト, 最短木, 多対多通信

Evaluation of Ad hoc Multicast Routing Protocol Using Shortest Path Trees for Many-to-Many Communications

Tsutomu KOZAKA[†], Toshihiko KATO[†], Shuichi ITOH[†], and Yoshiyori URANO^{††}

[†] Graduate School of Information Systems, University of Electro-Communications

1-5-1, Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo 182-8585, Japan

^{††} Graduate School of Global Information and Telecommunication Studies, Waseda University

1-3-10, Nishiwaseda, Shinjuku-ku, Tokyo 169-0051, Japan

E-mail: [†]{pink,kato,itoh}@net.is.uec.ac.jp, ^{††}urano@waseda.jp

Abstract In recent years, an ad hoc network is paid to attention, and a number of routing protocols are studied actively not only for unicasting but also for multicasting. It is considered that the shortest path tree based method is more suitable for ad hoc networks, because the network scale is smaller than the Internet and it is necessary to use the resource of wireless links effectively. In this paper, we propose a new ad hoc multicast routing protocol, which constructs the shortest path tree efficiently and guarantees the operation of Dense Mode such as the Broadcast & Prune and dynamic Join. This paper also describes the result of performance evaluation of our multicast routing protocol and ODMRP using network simulator ns-2. It evaluates the number of control messages and the multicast data transfer rate.

Key words Ad hoc Network, Multicast, Shortest Path Tree, Many-to-Many Communication

1. はじめに

近年アドホックネットワークが広く注目され, 各種ルーティングプロトコルの検討が行われている. これらの検討では, ユニキャストルーティングに加えてマルチキャストルーティングの提案も行われている. オンデマンド型のルーティングプロトコルの AODV (Ad hoc On-Demand

Distance Vector) [1] をベースとした MAODV (Multicast AODV) [2] や, メッシュを構成し送信者からの最短遅延パスを提供する ODMRP (On-Demand Multicast Routing Protocol) [3] がその代表例として挙げられる.

一方, アドホックネットワークのマルチキャスト通信の適用対象として, 消防活動支援ネットワークが考えられる [4]. この消防活動支援ネットワークにおいて, 消防隊

員は、隊員と消防本部間でアドホックネットワークを構成するための通信デバイスを装備する。ここでの音声通信やデータ通信は、全ての消防隊員と消防本部によって共有されなければならない。すなわち、消防活動支援ネットワークにおける通信は多対多の会議形式となり、通信デバイスの間ではマルチキャスト通信が行われる。ここで、通信デバイスはマルチキャストの送信者、受信者、及び転送ノードとして動作することになる。

MAODV では、各マルチキャストグループに通信ノードの1つがグループリーダーとなり、そのグループリーダーをマルチキャスト配送木の根とする共有木が構成され、その木に沿ってマルチキャストグループに対応するすべてのマルチキャストデータが転送される。このような共有木を用いた方式が多対多通信に適用されたならば、多くの送信者からのデータが最適な経路を経由して送信されない。これに対し、インターネットと比べて通信品質が低いアドホックネットワークにおいては、経路長の増加はパケットロスや遅延などの障害を引き起こす。また複数の送信者からのデータが共有木に沿って流れるために、トラヒックが特定のノードに集中し、高い確率で輻輳が発生すると考えられる。このためマルチキャストトラヒックが大きいアドホックネットワークでは、送信者と受信者間で最短パスを使用することが望まれる。

これに対し ODMRP では、最短遅延パスをサポートしている。マルチキャスト発信者が送信すべきデータを持ったときに、参加要求メッセージである Join Query をフラッディングし、マルチキャスト受信者は、Join Query に応答するために参加応答メッセージである Join Reply を返送する。このような手順により、マルチキャストのための最短遅延木が構成される。ODMRP はまた、マルチキャスト受信者がマルチキャストデータを受信したい場合に、明示的にグループへの参加メッセージを送信する Sparse Mode の形式を採用しているが、動的な Join や Leave に未対応である。このため、ネットワーク内の新たなマルチキャスト受信者がオンデマンドに通信を開始できない、あるいは既にマルチキャストデータを必要としないノードは、経路がタイムアウトするまでデータを受信し続けてしまうという問題がある。また、これらの問題を回避するために頻繁に Join Query を送信すると、Join Query および受信者が返送する Join Reply のオーバーヘッドの増加が懸念される。

そこで筆者らは、マルチキャストトラヒックの大きいアドホックネットワークを想定した、Dense Mode による新しいアドホックマルチキャストルーティングプロトコルの検討を行っている。提案プロトコルは、動的に低いオーバーヘッドで最短パスによるマルチキャスト配信木を構築し、Broadcast & Prune で配信木を保持し、さらにネットワー

ク内の新規参加ノードによる動的な Join もサポートしている。本稿では、ネットワークシミュレータ ns-2 [5] を用いて、マルチキャスト経路作成時の制御メッセージ数とマルチキャストデータ到達率の観点から提案方式と ODMRP との比較を行った結果について述べる。

2. 設計方針

提案プロトコルを設計するにあたり、以下のような設計方針を立てた。

(1) Dense Mode

多対多のマルチキャスト通信では、多くのマルチキャスト受信者が存在する。このため Broadcast & Prune による Dense Mode がパケット配信と最短木の維持に適していると考えられる。経路を要求する制御メッセージのフラッディングにより、最短木が構築された後すぐに、マルチキャストソースはデータをブロードキャストし、下流ノードを持たず、マルチキャスト受信者ではないノードが上流ノードへ枝刈りのための Prune メッセージを送信する。

(2) Reverse Path Forwarding

マルチキャストでは、RPF (Reverse Path Forwarding) をベースにしているため、マルチキャスト送信者へ向かう逆向きの経路を求めることが、データ転送の基本となる。一方、アドホックネットワークにおける多くのユニキャストルーティングでは、送信者が宛先への経路を探索するために経路要求メッセージのフラッディングを行い、この手順により宛先から送信者へ戻る経路情報が設定される。そこで、マルチキャストルーティングにおいても、この手順が適していると考えられる。つまり、マルチキャスト送信者がデータパケットの送信開始時に、経路要求メッセージをフラッディングし、受信者から送信者へ戻る経路を動的に設定する。この手順において、マルチキャスト送信者は、経路要求メッセージのフラッディングのみを行い、マルチキャスト受信者はどんな応答も行わない、オーバーヘッドを低く抑えた手法を導入する。

(3) 上流下流の依存関係の設定

マルチキャストルーティングにおいて、データ配信を効率的に行うために、上流ノードと下流ノードの関係を管理する必要がある。例えばインターネット用の Dense Mode のマルチキャストルーティングプロトコルである DVMRP (Distance Vector Multicast Routing Protocol) [6] では、Poison Reverse と呼ばれる手順を用いて、経路情報の交換の際に下流ノードが上流ノードへ明示的に登録する処理を行っている。ここで提案するルーティングプロトコルでは、最短木を構築するための経路要求メッセージのフラッディングにおいて、上流下流の依存関係の情報を交換するものとし、追加の制御メッセージを使用せずに依存関係を設定する手法を導入することとする。

(4) 動的な Join メッセージ

ODMRP ではサポートされていない、明示的な参加メカニズムを導入する。アドホックネットワーク内の新規参加したノードが、マルチキャストグループに参加したい場合に、次の経路要求メッセージのフラッディングを待たずに、参加要求メッセージを送信することでマルチキャストグループへの参加を可能にする。この場合においても、制御メッセージを減らすためのオーバーヘッドを低く抑えた方式を採用する。

3. 通信手順

本節では、提案するマルチキャストルーティングプロトコルの詳細な通信手順について述べる。

3.1 最短木の構築

マルチキャストデータを送信するノードは、送信開始時に MRREQ (Multicast RREQ) メッセージをブロードキャストする。このメッセージには、

- * マルチキャストソースの IP アドレス
- * マルチキャストグループアドレス
- * 送信シーケンス番号
- * 送信ノードからのホップカウント
- * 上流ノードの IP アドレス
- * プレホップ IP アドレス

などの情報を含む [7]。MRREQ を受信したノードは、MRREQ 内の上流ノードの IP アドレスが自身の IP アドレスと一致するかどうかを調べる。一致する場合には、その MRREQ の送信ノード (MRREQ 内のプレホップ IP アドレス) が自身の下流ノードであると判断する。この場合は、マルチキャスト送信ノード (S) とマルチキャストグループ (G) の組 (S,G) に対する最短木の下流ノードの情報を必要に応じて更新し、処理を終了する。

自身の IP アドレスではない場合には、送信ノードの IP アドレスと送信シーケンス番号から新たな MRREQ の受信であるかどうかを判断し、新たな受信の場合はその MRREQ の送信ノード (MRREQ 内のプレホップ IP アドレス) を、(S,G) に対する最短木の上流ノードとして登録する。以前に受信した MRREQ であれば、送信ノードからのホップカウントの小さいほうを上流ノードとして選定し、必要に応じて (S,G) に対応する最短木の情報を更新する。

続いて新たに上流ノードの登録・更新を行った場合のみ、MRREQ の再ブロードキャストを行う。再ブロードキャストの際には、ホップカウントを 1 増加し、上流ノードの IP アドレスとして登録・更新した IP アドレスをセットし、プレホップ IP アドレスに自身の IP アドレスをセットする。

また、下流ノードからの MRREQ の再ブロードキャストを待つためにタイマをスタートさせる。既にタイマがスタートしている場合にはリスタートする。MRREQ の再ブロードキャストを受信することなくタイムアウトした場合には、自身に下流ノードが存在しない (自身がリーフノード) と判断する。また、既に下流ノードとして登録済みのノードから、別のノードを上流ノードとして設定している MRREQ を受信した場合には、その MRREQ を送信したノードが自身の下流ノードではなくなったと判断する。

マルチキャストデータの送信ノードが送信すべきデータを持っている限りは、定期的に MRREQ をフラッディングする。これによりノードの移動によるトポロジの変化が生じて、最短木の再構築が可能となる。

この手順による最短木の構築例を図 1 に示す。ノード S が MRREQ をブロードキャストすると、それを受信したノード 1 と 2 がノード S を上流ノードと設定する (図 1(1))。ノード 1 が MRREQ を再ブロードキャストした時点 (図 1(2)) で、ノード S はノード 1 が下流ノードであることを知るとともに、ノード 3 と 7 はノード S からの最短木での上流ノードがノード 1 であることを知る。ノード 7 はノード 2,4,6 からの MRREQ も受信するが (図 1(3),(5),(7))、ノード 2 はノード S へのホップカウントが

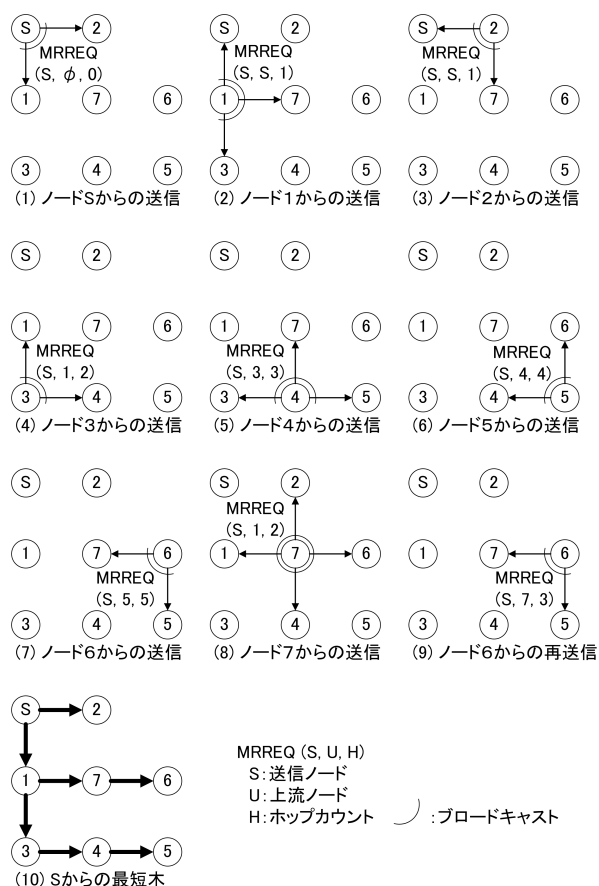


図 1 最短木構築の例

ノード1と同じであり、ノード4,6はノードSへのホップカウントがノード1より大きいため、ノード2あるいはノード4,6を上流ノードとするようなことはしない。これに対し、ノード6はノード7からより先にノード5からのMRREQを受信し、上流ノードとしてノード5を設定してMRREQの再ブロードキャストを行うが(図1(7))、その後ノード7からのMRREQを受信し、最短木での上流ノードがノード7であることがわかる(図1(8))。ノード6は新たな上流ノードとしてノード7を設定して再ブロードキャストを行うことによって、ノード7はノード6が下流ノードであることを知るとともに、ノード5は下流ノードであったノード6がノード7を上流ノードとして設定していることから、自身の下流ノードではなくなったことを知る(図1(9))。このような手順で図1(10)の最短木を構築することが可能となる。

3.2 枝刈りのよるマルチキャスト経路の構築

マルチキャストソースは前節で述べた手順を起動した後、マルチキャストデータの転送を開始する。受信する必要があるノードへのデータ転送を防ぐため、以下のような枝刈りの手法を用いる。構築された最短木のリーフノードでありかつマルチキャストグループのメンバではないノード、あるいは、すべての下流ノードがPrune状態でありかつマルチキャストグループのメンバではないノードが、上流ノードへPruneメッセージを送信する。Pruneメッセージは、マルチキャストグループ(G)に対して、あるいはマルチキャストデータの送信ノード(S)との組(S,G)に対して送信できるものとする。ただし、リーフノードではない場合は、全ての下流ノードが全てのマルチキャスト送信ノードに対してPrune状態の場合にのみ、(G)に対してPruneメッセージの送信が可能である。また、Pruneメッセージを送信するノードは、Prune状態の期間を示す任意のタイマ値を自身のPruneタイマにセットし、送信するPruneメッセージ内にも同じ値をセットする。

下流ノードからのPruneメッセージを受信した上流のノードは、そのメッセージを送信したノードをPrune状態とし、指定されたPruneタイマ値をタイマにセットする。ノードが複数のPruneメッセージを受信する場合には、最大のPruneタイマ値を選択する。また、全ての下流ノードからPruneメッセージを受信し、自身がメンバではないノードは、自身の上流ノードへPruneメッセージを送信する。その際にPruneメッセージのタイマ値は、自身の下流ノードがPrune状態であるタイマ値以上の値を設定することとする。

下流ノードが存在しない、あるいは全ての下流ノードがPrune状態であるノードはPruneタイマがタイムアウトするまで、Prune状態である(S,G)に対応するMRREQおよびマルチキャストデータの転送は行わない。

3.3 JRREQによる部分木の構築

ネットワーク内の新規参加ノードが、マルチキャストグループに参加したい場合に、JRREQをブロードキャストし部分木を構築することにより、オンデマンドにグループへの参加を可能にする[?]。JRREQは、マルチキャストグループ(G)に対してと、マルチキャストデータの送信ノード(S)との組(S,G)に対して送信することができる。JRREQは、グループのデータの送信ノード(または指定された送信ノード)、あるいは送信ノードからの最短木を構成するノードに到達するまで、ブロードキャストにより転送される。

JRREQが送信ノードあるいは最短木の構成ノードに到達したとき、JRREQを受信したノードは、MRREQをフラディングする。送信シーケンス番号は、以前に送信した最新の番号を用いることにより、既に構築されている最短木のツリーメンバは、受信するMRREQの再ブロードキャストは行わずに済む。最短木のノードが、送信ノードに代わりMRREQを送信する場合には、ホップカウントとして送信ノードへのホップ数が設定される。また、MRREQを送信するノードは、メッセージ内に上流ノードを明示してMRREQを送信するので、MRREQをフラディングする時点で、下流ノードは選択した上流ノードを

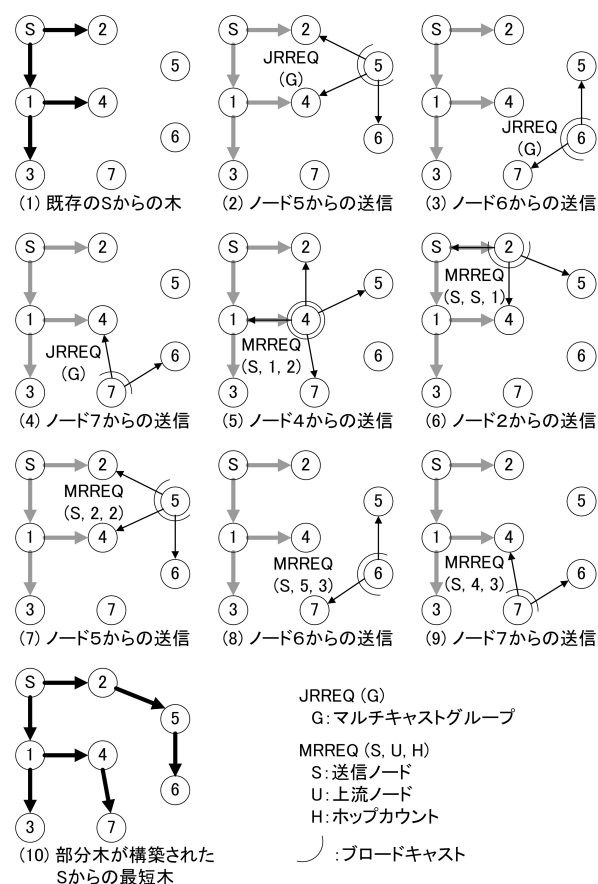


図2 部分木構築の例

指定して再送信するため、3.1 節で示した手順により、新たに構成される部分木においても、上流下流の依存関係も同時に設定することができる。

この手順による部分木の構築の例を図 2 に示す。既に送信ノード S からの最短木が構築されている状態で、ノード 5,6,7 が新たにネットワーク内に参加する (図 2(1))。ノード 5 はマルチキャストグループに参加するために、マルチキャストグループ (G) に対して JRREQ をブロードキャストする (図 2(2))。ノード 6,7 はグループ G に関するデータを送信しているノード S の存在を知らないので、JRREQ の転送を行う (図 2(3),(4))。これに対し、ノード 2,4 はノード S がグループ G のデータを送信していることを知っておりかつその最短木を構成するノードであるため、S に代わり MRREQ メッセージをブロードキャストする (図 2(5),(6))。ノード 2 とノード 4 からの MRREQ を受信するノード S,1,2,4 にとっては、新しい情報が含まれないのでその MRREQ は単に破棄される。ノード 2,4 からの MRREQ を受信するノード 5 は、ノード 2 を経由して、グループ G のマルチキャストソースであるノード S への最短パスを構築できることを知る。その後、3.1 節に示した手順に従ってノード 5,6,7 はそれぞれ 2,5,4 を上流ノードに設定し、MRREQ の再ブロードキャストを行う (図 2(7),(8),(9))。これにより、上流下流の依存関係が設定され、図 2(10) の最短木が構成される。

4. 性能評価

筆者らが提案するアドホックネットワーク用マルチキャストルーティングプロトコルをネットワークシミュレータ ns-2 を用いて ODMRP との比較を行った。なお、ODMRP の ns-2 用のソフトウェアについては [9] で公開されているものを使用した。

4.1 シミュレーション条件

1000m × 1000m の領域に 25 ノードをランダムに配置した図 3 のようなネットワーク構成を想定した。マルチキャストソースをノード 0 とし受信ノードをノード 1~4、ノード 1~9、ノード 1~14、ノード 1~19 と受信ノード数を変えて評価を行った。

シミュレーション条件は以下の通り。

表 1 シミュレーション条件	
無線伝播範囲	半径 250m
メディアアクセス方式	IEEE 802.11 に準拠
伝送速度	11Mbps

また移動は行わないものとし、マルチキャスト経路確率後に、1024byte のパケットを 1 秒間に 8 回送信する 64Kbps の固定速度通信を行い、500 秒間測定した。

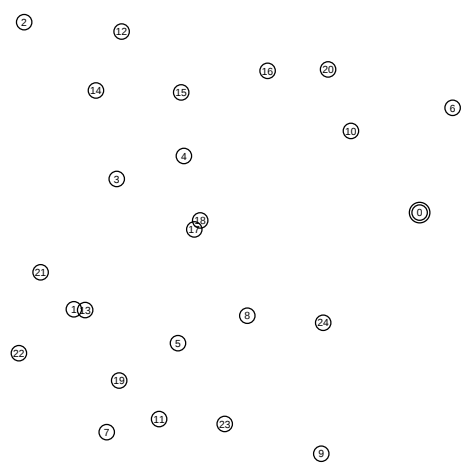


図 3 シミュレーションのネットワーク構成

4.2 制御メッセージ数の評価

提案プロトコルの MRREQ と ODMRP における Join Query のフラッディングを 3 秒ごとに 1 回行なわせ、制御メッセージ数の比較を行った。また Prune タイマは 10 秒とした。各々の制御メッセージの送信あるいは転送の総数の時間による推移を、図 4~7 に示す。図 4~7 はそれぞれ、グループメンバが 5 ノード (受信ノード:4)、10 ノード (受信ノード:9)、15 ノード (受信ノード:14)、20 ノード (受信ノード:19) の場合である。

グループメンバが少ない場合においては、マルチキャスト受信者が明示的にグループへの参加意思を示す Sparse-Mode の形式の方が Broadcast & Prune による Dense-Mode よりも、一般的に制御メッセージ数が少なくなると考えられる。しかしながら、図 4 のようにネットワーク内の 25 ノードのうち 5 ノードのみがグループメンバであったとしても、提案方式は ODMRP の制御メッセージ数の約 4 割程度に抑えられている。さらに、ネットワーク内のグループメンバ数が増加するにつれて、提案プロトコルと ODMRP との制御メッセージ数の差が顕著に現れ、グループメンバが 20 ノードである図 7 においては、提案プロトコルが ODMRP の制御メッセージ数の約 3 割程度に抑えられていることがわかる。

4.3 マルチキャストデータ到達率の評価

次にマルチキャストデータの到達率について、提案プロトコルと ODMRP との比較を行った。マルチキャストグループメンバの受信したマルチキャストデータの総数と到達率の結果を表 2 に示す。

ネットワーク内のマルチキャストグループメンバ数に関わらず、若干 ODMRP の方が提案プロトコルよりもデータ到達率が高いが、大きな違いは見られなかった。提案プロトコルは、MRREQ のフラッディングのみで経路が確立されていることがわかる。

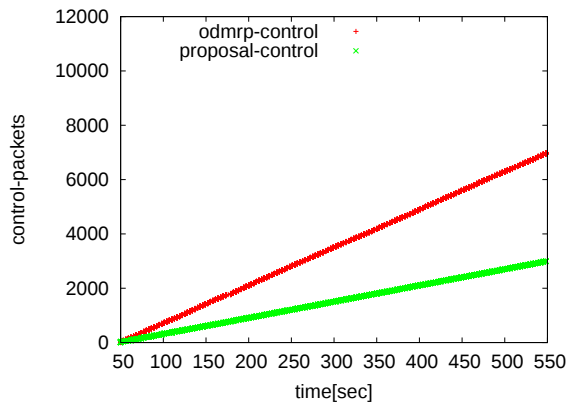


図 4 ODMRP vs Proposal (Group member : 5 Node)

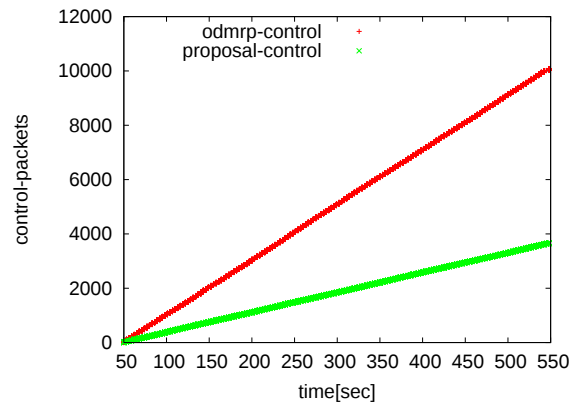


図 6 ODMRP vs Proposal (Group member : 15 Node)

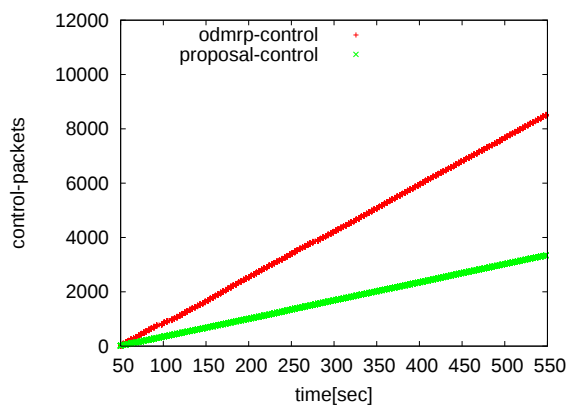


図 5 ODMRP vs Proposal (Group member : 10 Node)

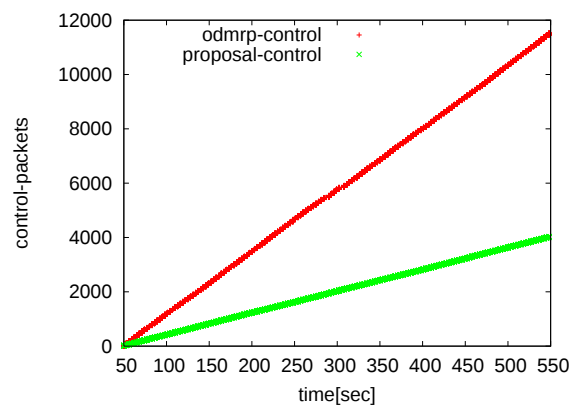


図 7 ODMRP vs Proposal (Group member : 20 Node)

表 2 マルチキャストデータ到達率

Number of Group member	ODMRP		Proposal	
	Total	Rate(%)	Total	Rate(%)
5 Node	15973	99.83	15864	99.15
10 Node	35986	99.96	35671	99.09
15 Node	55961	99.93	55565	99.22
20 Node	75944	99.93	75698	99.60

5. おわりに

本稿では、オンデマンド型のアドホックネットワークにおいて、最短木を用いて Broadcast & Prune による Dense Mode のマルチキャスト用ルーティングプロトコルについて提案し、評価を行った。提案プロトコルは、ODMRP とは異なり MRREQ に対する応答メッセージが不要であるため、マルチキャスト経路確立時の制御メッセージのオーバーヘッドが低く抑えられており、MRREQ のフラッディングのみで、送信者と受信者間の経路が確立されている。また ODMRP と比較しても、マルチキャストデータ到達率にほとんど違いは見られなかった。

さらに、MAODV では Join 時のメッセージ交換が 3 ウェイであるのに対し、提案プロトコルでは 2 ウェイでの

Join を可能にすることにより、Join 時の制御メッセージのオーバーヘッドも低く抑えられている。

文 献

- [1] C. Perkins, et al., "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," RFC3561, Jul. 2003.
- [2] E. M. Royer, et al., "Multicast Ad hoc On-Demand Distance Vector (MAODV) Routing," available at draft-ietf-manet-maodv-00.txt, Jul. 2000.
- [3] S. J. Lee, et al., "On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP) for Ad Hoc Networks," available at draft-ietf-manet-odmrp-04.txt, Feb. 2003.
- [4] 加藤他, "消防活動のためのアドホックネットワークを指向したマルチキャストルーティングプロトコルに関する一検討," FIT2004, M-075, Sep. 2004.
- [5] The Network Simulator - ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [6] T. Pusateri, "Distance Vector Multicast Routing Protocol," available at draft-ietf-idmr-dvmrp-v3-11.txt, Oct. 2003.
- [7] 小坂他, "最短木を用いるアドホックネットワーク用マルチキャストルーティングプロトコルの設計," 信学技報, NS2005-64, pp.13-16, Jul. 2005.
- [8] 小坂他, "最短木を用いたアドホックマルチキャストのための効率的な JOIN 方式," 信学 2005 年ソサイエティ大会, B-21-37, Sep. 2005.
- [9] Rice University Monarch Project: Mobile Networking Architectures, <http://www.monarch.cs.rice.edu/>