

中継ノードの最適化を図った MANET 用 マルチキャストルーティングプロトコルの 性能評価

野俣政善[†] 小山明夫[†] 荒井順平^{††}

アドホックネットワークは、インフラなしで携帯無線端末により構成されるネットワークである。ネットワークの伝送効率を上げるには、ルーティングプロトコルが重要となる。本稿では、データを中継する過剰なノードを削減することにより、ネットワーク全体のデータ転送量を減らすことのできるマルチキャストルーティングプロトコルを提案する。計算機シミュレーションにより既存のプロトコルと提案プロトコルとの性能比較を行った結果、提案プロトコルの方がネットワーク性能を改善できることを示す。

Performance Evaluation of Multicast Routing Protocol Attempting Optimization of Relay Nodes for MANET

Masayoshi Nomata[†], Akio Koyama[†]
and Junpei Arai^{††}

Ad-hoc network is a network where it is composed on the wireless terminal without the infrastructure. To raise the efficiency of the network, routing becomes an important problem. In the present study, it proposed the routing protocol that reduces the amount of the data traffic in the entire network by evaluating the necessity of the node that relays data, and reducing an excessive node. We compared the network performance of conventional protocols and the proposal protocol via simulation. The simulation results showed that the proposal protocol has good performance than conventional protocols.

1. はじめに

近年、ノート PC や PDA といった携帯端末[1]の急速な普及により、気軽に無線通信が可能となり、アドホックネットワーク[2]に関する研究が盛んに行われている。アドホックネットワークは、アクセスポイントなどのインフラを必要とせず、各端末が無線による通信を自律分散的に行うことで、いつでもどこでも情報のやり取りができる。その一方で、携帯端末の自由な移動性からネットワークトポロジが常に変化するため、それに合わせてデータの送信元から宛先までの経路を更新する必要がある。つまり、動的なトポロジの変化に柔軟に対応できるルーティングプロトコルが、アドホックネットワークにおいて重要な課題となる。

ルーティング手法は、主にユニキャストとマルチキャスト[3]に分類できるが、本研究では、災害時における非常時ネットワークの構築や、ショッピングモールでの広告配信で期待もてるマルチキャストに注目した。マルチキャストは、複数の受信者に同一のデータを送る場合に有効であり、先行の研究でもさまざまなプロトコルが提案されている。そこで今回、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) [4][5][6]を元にプロトコルの拡張を行う。ODMRP は、送信したいデータを持った端末がフォワーディンググループ (FG) と呼ばれる中継ノードを構築し、通信を行うルーティング手法である。FG は、同一マルチキャストグループ内でメッシュ状に構築されるため、迂回路を生成しやすく、他のプロトコルに比べて信頼性の高い通信が可能である。一方で、条件下によっては過剰な FG ノードを構築してしまい、FG 端末による過剰なデータ転送を起こしてしまう。そこで本研究では、提案する手法を用いて過剰な中継ノードを削減することで、ネットワーク全体のデータ転送量を減らし、信頼性を落とさずにデータの伝送効率を改善できるマルチキャストルーティングプロトコルを提案する。さらにパケット到着率や伝送遅延特性を既存のプロトコルである ODMRP と比較した結果について報告する。

2. 複数配信におけるユニキャストとマルチキャスト

ここでは、複数端末相手に同一のデータを送信する場合のユニキャストとマルチキャストによる帯域利用効率の違いについて述べる。

ユニキャストは、1対1の通信を行うためのルーティング手法である。そのため、複数配信の場合、図1に示すように宛先端末分のデータを送信元で生成する必要が

[†] 山形大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

^{††} 山形県立産業技術短期大学校
Yamagata College of Industry and Technology

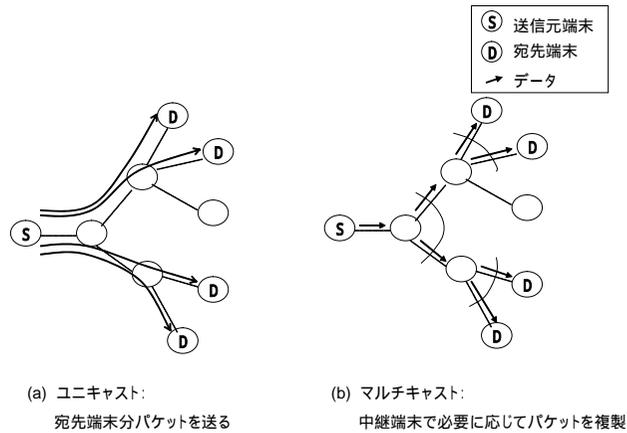


図1 複数配信におけるユニキャストとマルチキャストの違い

Figure 1 Difference between unicast and multicast by plural data transmissions.

ある。

また、フレームには IEEE802.11 MAC で使用するユニキャストフレームを用いるため、ACK パケットを利用した確認応答と、フレームの再送制御で信頼性の高い通信ができる。一方、マルチキャストでは中継端末で必要に応じてデータの複製を行う。これにより、帯域の利用率を抑えることが可能となる。本研究で扱う ODMRP は、ブロードキャストフレームを用いてデータの転送を行う。この場合、確認応答がなく、再送も行われないため、フレームの衝突が発生しやすい。つまり、通信の信頼性を落とさないためには、宛先端末までの経路として、冗長な中継ノードが複数必要と考えられる。

3. 既存のプロトコル

現在提案されているマルチキャストルーティングプロトコルである ODMRP と、SG[7] という概念で ODMRP の拡張を行ったプロトコルを以下で概説する。

3.1 ODMRP

ODMRP は、データの中継するノード集合である転送グループ (FG : Forwarding Group) を利用して、ブロードキャストを繰り返すことでデータの中継を行う。送信元ノードでデータ送信要求が発生すると、宛先までの経路構築 (FG ノードの決定)

を開始する。その際に用いられる制御パケットには、マルチキャスト参加ノードの探索のために利用される参加要求 (JQ : Join Query) と、それに対する応答として送信元ノードへ返信する参加応答 (JR : Join Reply) がある。以下でその構築過程を述べる。

まず図2のように、送信元ノード S が無線範囲内にある全てのノードに JQ をブロードキャストする。JQ を受信したノード 2,3,4 は、JQ に格納されている送信元アドレス S、前ホップアドレス S、マルチキャストアドレス A の情報を自身の経路テーブルに格納する。そしてノード 5,6 へと中継可能であるノード 3 は、JQ の前ホップアドレス S を自身のノードアドレス 3 に書き換え、再びブロードキャストによる転送を行う。これを繰り返すことで、最終的にネットワーク内におけるノード全体に JQ が到達される。

マルチキャスト参加ノード D が JQ を受信すると、経路テーブルに収まったアドレス情報を付加した JR を生成し、ブロードキャストで送信元ノード S へ返信する (図3)。JR を受信したノード 6 は、JR に格納されている送信元アドレスと経路テーブルに格納されている送信元アドレス、さらに JR に格納されている前ホップアドレスと自身のノードアドレスを比較する。この場合それぞれ S、6 と両方一致するので、ノード 6 は送信元・宛先端末間で最短経路であると判断し、FG テーブルにマルチキャストアドレス A を格納することで FG となる。ノード 6 は、JR に経路テーブルに格納してあるアドレス情報を追加し、再びブロードキャストを繰り返すことで送信元ノード S へ JR を返信する。送信元ノードは送信したいデータを持っている間、一定間隔で JQ をフラッディングすることで、新規マルチキャスト参加ノードの追加と経路更新を行う。

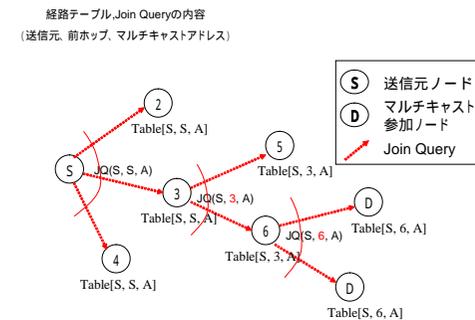


図2 Join Query フラッディング

Figure 2 Join Query transmission by flooding

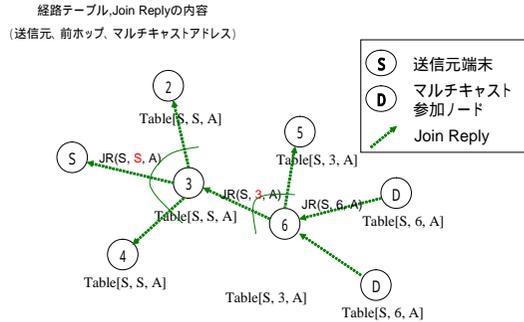


図3 Join Reply ブロードキャスト
 Figure 3 Join Reply transmission by broadcast

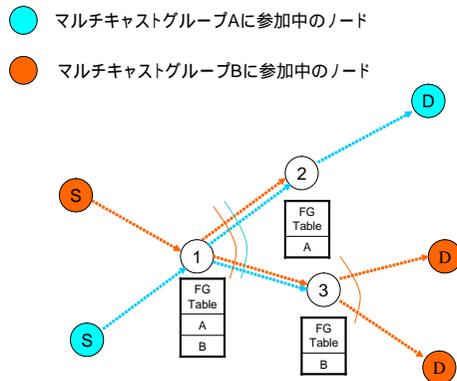


図4 マルチキャストデータの配信 (グループ数2)
 Figure 4 Transmission of multicast data (2 groups)

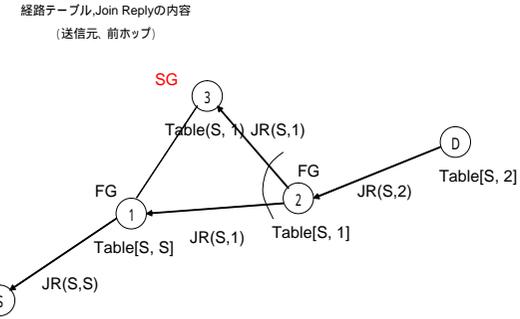


図5 SG ノードの決定
 Figure 5 Decision of SG Nodes

以上のような手順で FG が構築されると、送信元ノードがブロードキャストでデータの配信を開始する。図 4 はネットワーク内に 2 つのマルチキャストグループが構成されている場合である。ノード 1 がデータを受信すると、自身の FG テーブルに格納してあるマルチキャストアドレスを調べて、受信したデータのマルチキャストアドレスと一致していれば転送する。逆に一致していなければ、データを破棄する。このような処理を繰り返すことで、同一マルチキャストグループ内のメンバにデータが届く。

3.2 SG を利用した ODMRP

ODMRP にサポートグループ (SG : Support Group) という概念を加えた手法が提案されている。これは、SG と呼ばれるノードを隣接する 2 つの FG ノード間に構築し、そのノード (SG ノードと呼ぶ) が経路切断などによって引き起こされるパケット損失を補う。以下で SG の決定方法を述べる。

SG となるノードは ODMRP の JR 返信過程において決定される。図 5 はそのときの様子で、JQ フラッドイングが終了し、各ノードの経路テーブルに経路情報が収まった状態である (マルチキャストアドレスは省略)。

まず ODMRP と同様に、マルチキャスト参加ノードである D は、自身の経路テーブルに格納された情報を JR に格納し、ブロードキャストで返信する。すると、ノード 1, 2 は経路上のノードと判断し、FG に加入する。一方、ノード 3 からブロードキャストされた JR は、ノード 3 も受信する。このときノード 3 は、経路上でないため FG とな

らないことを確認すると、JR に格納されている各アドレス情報と、自身の経路テーブルに格納されているアドレス情報を比較し、一致するものがないか調べる。この場合、ノード2でJRに追加したエントリ(S,1)とノード3の経路テーブルのエントリ(S,1)が一致する。これにより、ノード3はノード1,2の両FGノードに隣接していることが確認でき、自身のSGテーブルにマルチキャストアドレスを格納することにより、SGに加入する。

以上の手順でSGとなったノードは、隣接するFGノードから同一パケットを2回受信することになる。しかしノードの移動などによりFG間やFG-SG間のリンクが切断した場合、片方のFGノードからしかパケットを受信できなくなる。この場合SGノードは、パケットが正常に流れていないと判断し、データを転送する。具体的には、SGノードが1つめのパケットを受信した際に制限時間を設け、時間内に同一パケットを受信するかどうかで転送の有無を決定する。この手法は、SGノードが損失パケットのバックアップとして働くため、通信の信頼性の向上が期待できる。

3.3 既存のプロトコルの問題点

ODMRPでは、FGをマルチキャストグループ内で共有することにより、多くの代替経路を確保できる。しかし、図6のように送信元ノードと宛先ノードがネットワーク内に配置されているような状況においては、過剰なFGノードが選出されやすい。過剰なFGノードによるデータ中継が増えることにより、ネットワーク全体のデータ転送量の増加につながり、パケット到達率や遅延の低下を引き起こすと考えられる。

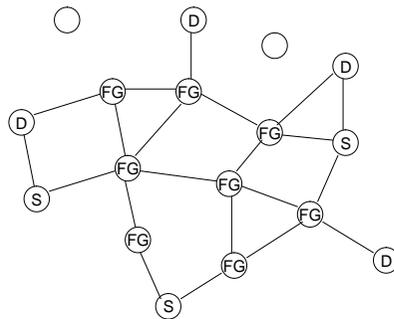


図6 FGノードの共有
Figure 6 Sharing of FG nodes

さらに、ノードの消費電力を抑えるという観点から見ても、無駄に電波送信回数を増やすのはよくないといえる。

また、SGを利用したODMRPでは、グループ内における送信元ノードが少ない場合など、過剰なFGが選出されない場合においては有効である一方で、FGが多く構成される状況では期待通りの成果はでないという報告がある。

4. 提案手法

この章では、ODMRPを改良し、FGノードで経路上必要性があるかどうかを評価し、FGノードの削減を行う手法の提案を行う。ただし、2章で述べたように、データはブロードキャストフレームによる転送となるので、ただFGを削減しただけではODMRPの特徴であるメッシュ構造による迂回路が減ってしまい、通信の信頼性を落とすことになりかねない。そこで、SGの概念を利用し経路代替性を保つことで、通信の信頼性を落とさずに、伝送効率の良いルーティング手法を提案する。

4.1 提案手法の概要

経路構築はJQ, JRによって行われ、ODMRP同様経路上にFG, その周辺にSGを構成する。FGノードは、JRを一定時間(タイムアウト時間と呼ぶ)受信しなかった場合に、FGから脱退する。SGノードは、タイムアウト時間経過までデータの代替中継を行い、経過後はSGから脱退する。

経路構築後、FGに加入したノードは、0.3[s]ごとにFG切り替えの評価を行う。評価条件が満たされれば、FGから脱退し、以後データを受信しない。評価条件が満たされなければ、次の評価時間(0.3[s]後)の評価まで待機する。具体的な評価方法としては、以下の小節で説明するFG経過時間による評価結果A1とJR受信数による評価結果A2を加算したものを最終的な評価値W(式1)とし、その値が閾値Thを越えた場合にFGの脱退を行う。

FG脱退評価基準となる閾値Thは、式2を用いて決定する。この式は、評価するノードの送信キューの状態を考慮している。qがノードのキューにたまっている現在のパケット数、Q_Mがノードに格納できる最大パケット数で、ネットワークの負荷状況が高くなるほどThの値は小さくなる。Thが小さくなると、評価基準が下がり、FG脱退の可能性が高くなる。これは、高負荷のかかっているノードは、キューあふれによるパケット損失が多く、パケット中継が困難と考えられるためである。

$$W = A1 + A2 \quad (1)$$

$$Th = 0.8 - \left(\frac{q}{Q_M} \times 0.2 \right) \quad (0.6 \leq Th \leq 0.8) \quad (2)$$

4.2 FG 経過時間による評価

FG ノードは、タイムアウト時間の間 JR 受信による更新がなかった場合、FG から脱退しデータの中継を停止する。タイムアウト時間の設定は、過去の研究によると経路の代替性を保つために JQ 送信間隔の 3~5 倍が良いとされている。しかし、JR 受信によるタイムアウト時間の更新がなく、FG に加入してからの時間が長いノードは、過去の経路構築により加入した FG となるので、経路上において必要性が少ないと考えられる。このような考え方を元に、 F_p を FG 加入の最終更新時からの経過時間、 F_M を設定した FG タイムアウト時間とし、式 3 により加算値 A1 として算出する。計算式に 2 乗を使っているのは、FG 経過時間の短いノードの評価値を抑え、頻繁に FG から脱退するのを防ぐためである。また、A1 の値は、FG 経過時間による評価だけが最終評価値に影響しないように、0.45 という上限を設けてある。

$$A1 = \frac{F_p^2}{F_M^2} \quad (0 \leq A1 \leq 0.45) \quad (3)$$

4.3 JR 受信数による評価

多対多通信の場合、マルチキャスト参加メンバが送信元となり、各々が JQ による経路探索を行う。図 7 はそれに対する JR 受信の様子を描いたもので、ノードに書かれている数字はそのノードが受信した JR の数を表す。JR 受信数が多いノードというのは、多くの送信元・宛先ノード間で最短経路上に位置し、データ転送時に共有されるノードとなる。逆に、JR 受信数が少ないノードは、ネットワーク全体から見れば、データ転送においてそれほど重要ではないといえる。

図 8 は JR 受信数が少ないノードを FG から除外した場合のデータ転送の様子である。JR 受信数が 1,2 のノードを FG から除外しても、全ての送信元・宛先ノード間でデータの送受信ができていくことがわかる。これにより、除外した FG ノードからのデータ転送が停止し、ネットワーク全体のデータ転送量を有効に減らすことが可能であると考えられる。

式 4 は JR 受信数による評価で算出する加算値で、 JR_r は各ノードが JQ 送信間隔と同様の時間 3[s] を区切りとして JR 受信数を測っておいたものの平均、 JR_w はネットワークの平均的な JR 受信数である。 JR_w は、JQ ヘッダに新たに送信元 JR 受信数のフィールドを設け、ネットワーク内の送信元ノードから送信される JQ からその情報を取得し、平均を算出する。これにより、ネットワーク内のマルチキャスト参加メンバ数がおおよそ把握でき、各ノードは、全体に対する相対的な JR 受信数として算出できる。式 4 で 0.2 をかけているのは、評価値を調整するためである。また、FG 経過時間による評価と同様の理由で、0.55 という上限を設けてある。

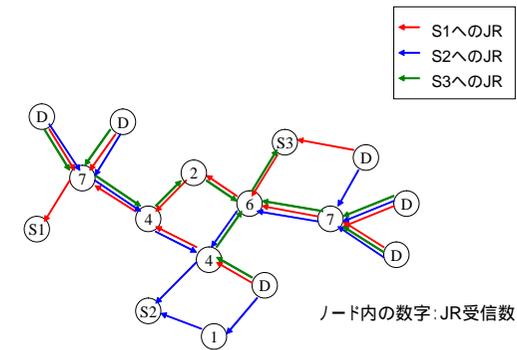


図 7 JR 受信によるカウント
 Figure 7 Count by JR packet reception

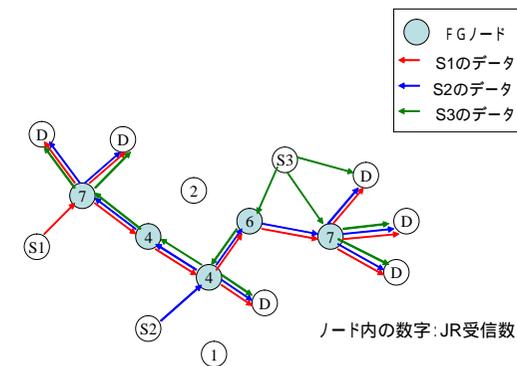


図 8 経路を制限したデータ転送
 Figure 8 Transmission of data that limits route

$$A2 = \frac{JR_w}{JR_r} \times 0.2 \quad (0 \leq A2 \leq 0.55) \quad (4)$$

4.4 FG 切り替え評価の例

表1は実際に評価を行った結果の例で、図9はそのときの状態を表したものである。各ノードは、以上で説明したFG経過時間、JR受信数の評価でWを算出し、その値がそのときのネットワークの負荷状況により左右される閾値Thを越えるかどうかでFG脱退の有無が決定される。FG脱退が行われなければ、次の評価時間まで延長することになる。

この例では、各FGノードは次のような状況となっている。ノードBはJR受信数が5と多いため、A2の値が0.24となり、FGタイムアウト時間に近づかないと評価値が閾値に届かない。ノードF、GはともにJR受信数が1でA2の値が0.55と上限に達しているが、GはFG経過時間が短いため、評価値が閾値を超えない。このように、評価の一方に偏りがないようにしている。

4.5 SG による経路代替性の確保

ODMRPでは、データ転送をブロードキャストで行うため、衝突によるパケット損失が多くなる。そのため、提案手法で行うFG脱退により迂回路が減り、通信の信頼性が落ちる。そこで、隣接するFG間にSGを構築することで、FGから脱退した分の経路代替性を補う形で機能させる。FGノードは、常にパケットを転送するのに対し、SGノードは損失した分だけパケットを転送させるので、経路の代替性を保ちつつ、データ転送量を減らすことができる。

5. 性能評価

提案手法の有効性を示すためにODMRP、ODMRP_SGとの性能を計算機シミュレーションで比較し、評価した。

5.1 シミュレーション条件

シミュレーションはノード数50のうち、マルチキャスト参加メンバー数を5に固定しパケット発生間隔を変化させた場合と、パケット発生間隔を100[ms]に固定しマルチキャスト参加メンバー数を変化させた場合のパケット到達率と平均遅延を評価した。

ノードの移動は、Random Directionモデルを採用した。これはフィールド内のある平均速度で、ランダムな時間と方向で移動を繰り返すモデルである。今回のシミュレーションでは、1000×1000[m²]のフィールドを4[m/s]の速度で移動を繰り返す。これは、人が少し早めに歩行する速度となる。無線通信の設定は、無線電波範囲を250[m]、帯域幅を2M[bps]と設定した。

表1 評価結果の例

Table 1 An example of evaluation result

ノード	A1	A2	W	Th
B	0.11	0.24	0.35	0.66
F	0.45	0.55	1.00	0.72
G	0.11	0.55	0.66	0.70

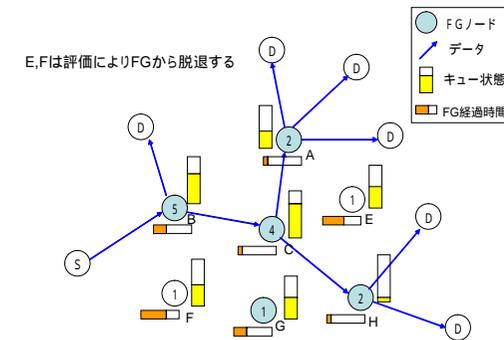


図9 FGノードの切り替え例

Figure 9 Example of switching FG nodes

シミュレーション時間は90[s]としたが、ネットワークの定常状態を計測するため、9~81[s]の間でデータを収集した。その他の条件は、データパケットサイズ512[Byte]、キューサイズ40[packet]、FGタイムアウト時間9[s]、SGタイムアウト時間3[s]、SGタイマー時間(パケット再送制御の制限時間)250[ms]、JQ送信間隔3[s]とした。

5.2 結果及び考察

シミュレーションによって得られた結果を図10~11(マルチキャスト参加メンバー数を5で固定)と、図12~13(パケット発生間隔を100[ms]で固定)に示す。横軸がパラメータで、縦軸が各評価項目を表す。

図10からODMRP_SGは、ODMRPよりも高負荷時にパケット到達率が大きく低下している。本シミュレーションでは、50[ms]を境に輻輳が発生しており、キューあふれによるパケット損が増加している。そのため、SGノードによるパケットの代替中

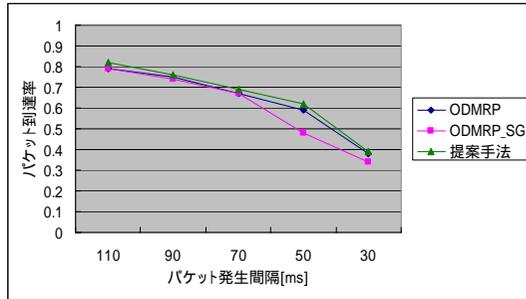


図 10 パケット発生間隔に対する到達率

Figure 10 Delivery rate versus generation interval of packets

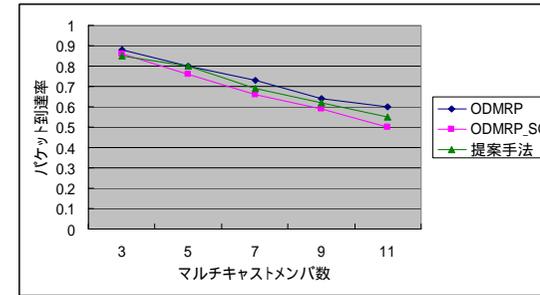


図 12 メンバ数に対する到達率

Figure 12 Delivery rate versus number of multicast members.

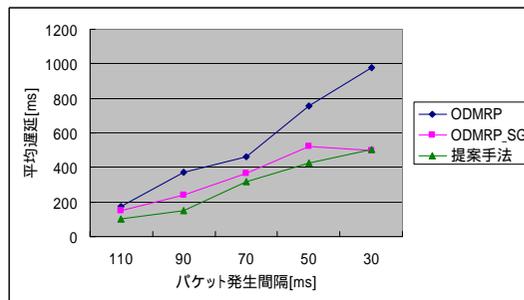


図 11 パケット発生間隔に対する平均遅延

Figure 11 Average delay versus generation interval of packets

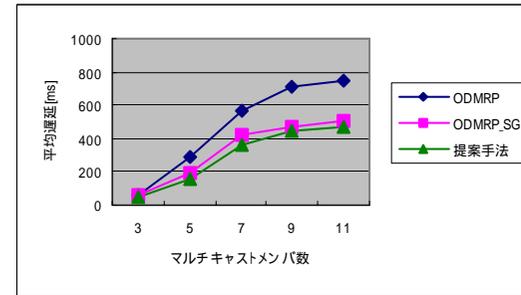


図 13 メンバ数に対する平均遅延

Figure 13 Average delay versus number of multicast members

継が急増し、これがパケット到達率の低下を招いている。一方提案手法では、必要性の少ない FG ノードを削減することでネットワーク全体のデータ転送量を抑えている。さらに SG ノードによる損失パケットの再送が行われるため、全体的に見てもパケット到達率が劣化していないことがわかる。

図 11 から ODMRP の平均遅延は、輻輳が発生している 50[ms]から急上昇しているのに対し、ODMRP_SG および提案手法では、大幅に遅延の上昇を抑えている。これは、SG ノードが周辺の高負荷がかかっている FG ノードの代替中継をすることで、結果的に到達時間が下がっているといえる。さらに提案手法では、FG ノードを削減することで、ネットワーク全体のパケット転送量を抑えているので、遅延を最小限に抑えている。

図 12 から提案手法は、ODMRP よりも若干パケット到達率が低下している。これは、マルチキャスト参加メンバ数が増えると、JQ による頻繁な経路構築が起これ、SG ノードの数が FG ノードに比べて極端に少なくなり、十分なパケットの代替中継ができなくなってしまったためであると考えられる。しかし、極端な到達率の低下は発生していないことがわかる。

図 13 が示すように平均遅延は、ODMRP よりも提案手法は全体的に改善されている。これは FG ノードの削減によってネットワーク全体のデータ転送量を抑えつつ、SG ノードによる高負荷な FG ノードの回避ができているためである。

6. まとめ

本稿では経路の必要性評価によりデータを中継する FG ノードを削減し、ネットワーク全体にかかる負荷を抑えつつ、SG ノードで損失パケットの中継を補うマルチキャストルーティングプロトコルを提案した。その結果提案手法は、既存のプロトコルよりも通信の信頼性を落とさずに平均遅延を削減できることを示した。

しかし、マルチキャストグループ内に送信元として働くノードが増えると、SG ノードが減り、十分な経路代替性を確保できなくなる。このことから今後の課題として、SG のような機能を持つノードを確保できる仕組みを考えることが必要である。

また、提案手法では、FG を脱退させるノードの周辺に SG ノードがあるとは限らず、パケット損失のバックアップとして、十分に働いているとはいえない。よって、削減する FG の位置の周辺に SG ノードを働かせることを念頭に改良をしていく必要がある。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究費(C)(21500067)の研究助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) Andrew S. Tanenbaum 著, 水野忠則・相田仁・東野輝夫・太田賢・西垣正勝 訳: コンピュータネットワーク, 日経 BP 社, (2003).
- 2) C-K.Toh 著, 構造計画研究所 訳: アドホックモバイルワイヤレスネットワーク - プロトコルトシステム -, 共立出版株式会社, (2003).
- 3) 間瀬憲一・阪田史郎 共著: “アドホック・メッシュネットワーク ユビキタスネットワーク社会の現実に向けて”, コロナ社, (2007).
- 4) IETF MANET INTERNET DRAFT: “On-Demand Multicast Routing Protocol(ODMRP), for Ad Hoc NetWorks”, (2000). <http://www.mizunotomoaki.com/odmrp/001.html>
- 5) Shinsuke Terada, Takumi Miyoshi, Kaoru Sezaki: “Distributed Multicast Routing Reducing Forwarding Nodes for Ad Hoc Networks”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J90-B, No.10, pp.957-968, (2007).
- 6) Shapour Joudi Begdillo, Mehdi Asadi, Abolfazl Toroghi Haghghat: “Improving Packet Delivery Ratio in ODMRP with Route Diversity”, International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS), Vol.7, No.12, pp.146-151, (2007).
- 7) Chikara Suzuki, Fumiaki Sato: “Reliable Multicast Routing for Ad-Hoc Networks”, 情報処理学会研究報告, 2003-DPS-115, pp.7-12, (2003).