

Anycast RP の転送効率向上を目的とした 配送経路の構築手法

A Method for Construction of Multicast Distribution Tree to Improve Transmission Efficiency by Anycast RP

鍵田 啓介[†]東 達軌[‡]松澤 智史[§]武田 正之[§]

Keisuke Kagita

Tatsuki Higashi

Tomofumi Matsuzawa

Masayuki Takeda

1. まえがき

近年、インターネット上のトラフィック量はユーザの増加やサービスの発展に伴って増加の一途を辿っており、数年先にはトラフィック量が倍増すると予測されている^{注1}。またネットワーク中を流れるコンテンツは動画像や音声といったリッチコンテンツが大半を占めており、このようなコンテンツを効率的に配信する手法が必要となっている。この手法の1つとしてマルチキャストという技術がある。マルチキャストは同一の情報を複数の受信者に送信する際、経路が同じである限りは1つのデータとして扱い、経路の分岐するルータではデータを複製して受信者に転送するという通信技術である。この機構によりネットワーク中を流れるパケットの量を抑制することができ、ネットワークの負荷を軽減し、効率的な配信が可能となる。

マルチキャストでは木構造の配送経路(以下、配送木と呼ぶ)に従ってパケットが転送されるため、配送木の構造が転送効率に大きな影響を与える。現在、送受信者が散在するような環境でのマルチキャスト通信には、送受信者を最短経路で繋ぐ最短木と、複数の送信者で1つの経路を共有できる共有木という2種類の配送木が使用されている。共有木ではRP(Rendezvous Point)と呼ばれる特殊なルータを根とした経路を構築するため、負荷が集中しやすく、単一障害点となりやすい問題点がある。この問題点の解決方法の1つとして、Anycast RP[1]という通信手法がある。Anycast RPでは複数のRPをネットワーク中に配置することで負荷分散を行う。複数のRPはそれぞれ受信者を葉とした共有木を持つ。RP同士が通信を行うことで複数の共有木を1つの配送木として連結している。RP同士の通信では一般的にMSDP(Multicast Source Discovery Protocol)[2]が使用されるが、1つのマルチキャストネットワーク内に複数のRPを配置し、Anycast RPとMSDPを用いた場合、転送効率の面に問題がある。今後のユーザの増加やネットワークの発達に伴い、1つのマルチキャストネットワーク内のノードが増加したり、複数のAS

を跨るようなマルチキャストネットワークが発生すると、これらの問題は非常に顕著となる。

本稿では、1つのマルチキャストネットワーク内においてAnycast RPを使用するにあたり、MSDPに代わるRP間の通信手法を提案し、転送効率の評価を行う^{注2}。

2. 既存技術

2.1. 配送木

2.1.1. 最短木と共有木

送受信者^{注3}が散在するようなネットワークにおいて、受信者がマルチキャスト通信でデータの配信を受けるにはマルチキャストグループへ明示的に参加を要求する必要がある。このとき配送木の根となるルータに向かってJoin Messageを送信する。メッセージがルータを経由したとき、受け取ったインタフェースに対してマルチキャストパケットを転送する旨の情報(以下、経路情報と呼ぶ)がルータに記録され、配送木が構築される。

最短木は各送信者を根とした配送木を構築する。受信者はマルチキャストグループ G に参加するとき、送信者 S に向かって (S, G) という経路情報を持つJoin Messageを送信する。一方、共有木はRPを根とした配送木を構築する。受信者はマルチキャストグループ G に向かって $(* , G)$ という経路情報を持つJoin Messageを送信する。送信者がデータを送信するときはRPに向かって送信を行い、RPは受け取ったパケットを配送木に沿って転送する。これにより複数の送信者で1つの配送木を共有できる。なおRPはネットワーク管理者によって設置された複数のC-RP(Candidate RP:候補RP)のいずれかが選出される。

2.1.2. 配送木の比較

表1において最短木と共有木の利点と欠点を踏まえ、経路情報の総数、転送遅延^{注4}、トラフィック量の観点で比較を行う。表1では経路情報の総数のオーダにおけるマルチキャストグループの数を g 、送信者数を s としている。最短木は送信者から受信者へ最短経路で配送木を構築するため、転送遅延や発生するトラフィック

[†]株式会社インターネットイニシアティブ ネットワーク本部 ネットワークサービス部
Network Division Network Service Department, Internet Initiative Japan, Inc.

[‡]株式会社ネクスト Home's 事業本部 プロダクト開発部 リッセルラボラトリーユニット
Littel Laboratory Unit Product Development Division HOME'S Business Department NEXT Co., Ltd.

[§]東京理科大学 理工学部 情報科学科
Department of Information Sciences, Tokyo University of Science.

^{注1}<http://www.cisco.com/web/JP/solution/isp/ipngn/literature/pdf/white-paper.c11-520862c11.pdf>

^{注2}以降、ネットワークとは1つのマルチキャストネットワークを指すものとする。

^{注3}本稿における送信者・受信者とは実際の送信者・受信者がいるサブネットとの間でマルチキャストパケットの転送を行うルータを指す。

^{注4}本稿における転送遅延とは送受信者間のパケット転送にかかる時間とし、ホップ数の増加に伴って増えるものと定義する。

表 1: 最短木と共有木の比較 .

	経路情報の 総数のオーダー	転送遅延	トラヒック量	配送木の根
最短木	$O(g \cdot s)$	小	小	各送信者
共有木	$O(g)$	大	大	RP

が最小となる利点がある．しかし送信者ごとの経路情報をルータに記録するため，ネットワーク中で保持される経路情報が非常に多くなるという欠点がある．共有木は送信者の数に関わらず 1 つの配送木を共有するため，ネットワーク中で保持される経路情報が少ない．しかし RP を経由する性質上，送受信者と RP の位置関係に転送効率が大きく左右される．RP の近くに送信者がいる場合は転送遅延は少ないが，送信者が RP から遠い場合，送信者から RP にパケットが到達するまでの転送遅延は大きくなる．このように経路が最短になるとは限らないため，転送遅延やトラヒック量が増加する欠点がある．また配送木の根となる RP にトラヒックが集中することにより，RP に負荷がかかり単一障害点となりやすい点や，一度 C-RP 中から RP が選出されると以降 RP の位置が固定され，ネットワークの動的な変化や障害発生時に対処できない点も問題点として挙げられる．

2.2. Anycast RP

共有木の RP の耐障害性の問題について，Anycast RP では，RP を複数配置し，冗長化することで負荷分散を行う．受信者から RP への経路は Anycast 通信 [4] を利用して構築する．RP 間の通信では一般的に MSDP が使用される．MSDP は，あらかじめ管理者によって MSDP ピアが設定され，ピア同士で P2P (Peer to Peer) 通信を行う．Anycast RP 上では，複数の RP をそれぞれ MSDP ピアとする設定が一般的である^{注 5}．これは，送受信者が散在する環境で使用されるマルチキャストの代表的なルーティングプロトコルである PIM-SM (Protocol Independent Multicast - Sparse Mode) [3] では，マルチキャストグループごとの RP が 1 つであることを想定しており，複数の RP が存在する状況を想定していないためである．そのため，複数の RP 同士を全て，マルチキャスト通信と異なる P2P 通信によって繋げることで，配送経路全体を連結している．

配送経路の構築の際，複数の RP に対して同一の Anycast アドレスを割り振る．マルチキャストグループ G に参加したい各受信者は，Anycast 通信を利用してこの Anycast アドレスに $(*, G)$ の Join Message を送信する．Join Message はルーティングテーブル上で経路が最も近いとされる C-RP に到達し，各受信者はそれを根とした共有木に加わる．

送信者は受信者と同様に Anycast 通信により最も近い C-RP に対してパケットを送信する．C-RP は他の

C-RP のアドレスを把握している．

C-RP は，自身が根となる共有木にマルチキャストで転送を行い，送信者からのパケットに関しては更に他の C-RP へユニキャストで転送する^{注 6}．

これにより RP を冗長化して負荷分散することができ，共有木の RP への負荷の集中と単一障害点となる問題に対処している．

2.3. 既存技術における問題点

マルチキャストで使用される配送木は，現在最短木が主流となっている．また共有木と Anycast RP は最初のデータの通信を行った段階ですぐに最短木に移行する設定が主となっており，最短木を構築するために一時的に形成する経路として利用されている．しかし小林らの研究 [5] では，メモリ容量の少ないルータにとって，送受信者数やグループ数が大きくなる通信において，経路情報の増加が深刻な問題になると述べている．

このような理由から，最短木によるマルチキャスト運用は経路情報の肥大化により困難となる．そのため，共有木や Anycast RP といった経路情報を少なく保つことのできる通信手法が必須となる．しかし，共有木には 2.1.2 節で述べたような問題点がある．また，Anycast RP にも C-RP 間の転送がユニキャスト通信である点や，2 つの C-RP を経由することが転送遅延の増加につながるといった問題点がある．

更に，1 章で述べたように，今後ネットワーク内のノードの増加や，複数のネットワークを跨ぐようなマルチキャストネットワークが発生してきた場合，これら転送効率や経路情報における課題は非常に顕著な問題となるため，改善を行う必要がある．

3. 提案手法

本稿では，送受信者が多数発生するような 1 つのマルチキャストネットワーク中において，Anycast RP の転送効率向上を目的とした配送木の構築手法を提案する．提案手法では RP 間の通信に最短木を使用する．なお，ネットワーク中のルータや送受信者を総称してノードと呼ぶ．配送経路は以下のようにして構築する．

1. Anycast RP 同様，ネットワーク中に複数の C-RP を設定し，Anycast アドレスを割り当てる^{注 7}．各 C-RP はネットワーク中で疎な位置に設定されているものとする．
2. マルチキャストグループ G への参加者は Anycast 通信により最適な^{注 8} C-RP を根とした共有木に加わる．ここで，自身を根とする共有木に受信者を 1 つ以上持つ C-RP をアクティブな RP と定義する．
3. アクティブな RP は自分以外の C-RP である crp に (crp, G) の Join Message を送信する．これによ

^{注 6} MSDP ピアである RP がパケットをカプセル化し，P2P 通信によって他の RP へ転送する．パケットを受け取った他の RP はカプセル化を解除し，自身を根とする共有木へ転送を行う．

^{注 7} 提案手法における C-RP は MSDP ピアではない．

^{注 8} 本稿における最適の定義とはホップ数が最小な経路になることと定義する．

^{注 5} 本稿では 1 つのマルチキャストネットワーク内での通信を目的としているため，その環境下で Anycast RP の RP 間通信を行う手段として用いる．

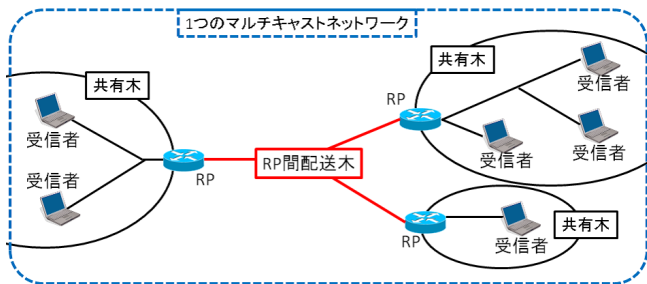


図 1: 提案手法における配送木。

り全てのアクティブな RP が、動的に全ての C-RP を根とする最短木を構築し相互通信を行う（以降、これを RP 間配送木と呼ぶ）。

提案手法により、図 1 のような配送経路が構築される。またパケット送信時には以下のような手順で転送を行う。

1. Anycast RP 同様、送信者は Anycast 通信により最適な C-RP である crp' にパケットを送信する。
2. 送信者からパケットを受け取った crp' は、自身を根とした RP 間配送木にこれを転送し、更に自身がアクティブな RP である場合は自身を根とした共有木に対しても転送する。
3. crp' を根とした RP 間配送木からパケット転送を受けたアクティブな RP は、これを自身を根とした共有木に転送する。

なお提案手法では最短木への移行は行わない。

既存手法では図 2 のようにパケットが配送される。一方、提案手法では図 3 のようにパケットが配送される。図 2、図 3 では RP 間のパケット転送部分を破線の矢印で示している。提案手法では、RP 間配送木と、アクティブな RP を根とした共有木の両方に含まれるノードでは、同一のグループの経路情報であるため、RP 間配送木を通じてのパケット転送時に共有木の経路にもパケットが転送される。また、Anycast RP では受信者のいない共有木を持つ RP にもパケットが転送されるが、提案手法では受信者のいない共有木を持つ RP はアクティブな RP ではないため、最短木に加わらずパケットが流れない。そのため、無駄なトラフィックが削減される。

これらにより提案手法では、転送効率が最短木に近い配送木を構築でき、Anycast RP と MSDP による通信の問題に対処している。

なお、PIM-SM ではネットワーク中に RP が複数存在することを想定しておらず、複数の C-RP の中から RP を 1 つ選択する仕様となっている。提案手法では、複数の C-RP のうちアクティブな RP となったものが RP 間配送木による通信を行う。アクティブな RP は複数存在し得る。そのため、アクティブな RP によるパケットの転送（送信者からのパケットと他のアクティブ

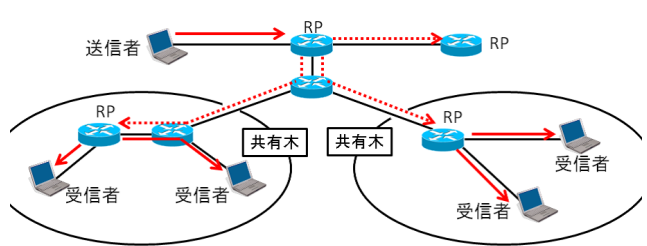


図 2: Anycast RP と MSDP によるパケット配送。

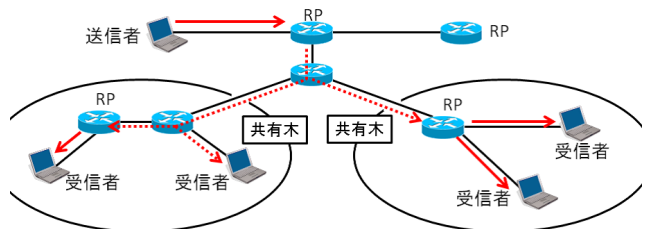


図 3: 提案手法におけるパケットの配送。

な RP からのパケットを区別し、転送する）、受信者の発生したアクティブな RP による、他のアクティブな RP を根とした最短木への動的な参加などを行えるように、PIM-SM の仕様を変える必要がある。前者にはパケットにフラグ情報を持たせて区別をする、後者は PIM-SSM (Protocol Independent Multicast – Source Specific Multicast) [6] を利用する方法などが考えられる。

4. 実験環境について

4.1. 実験の概要

提案手法の優位性を示すため、汎用的なネットワークシミュレータである NS2 (Network Simulator version 2)^{注 9}を用いて実験を行う。Anycast RP と MSDP による経路と、提案手法における配送木を比較し、評価する。また、転送効率の目安として、最短木、共有木とも比較を行う。なお Anycast RP と共有木は最短木に移行する機能があるが、本稿では最短木の評価を別途行うため、最短木への移行は行わない。共有木、Anycast RP は経路が最短木へ移行せずに維持される場合を評価の対象とする。

評価の際は、共有木および最短木における利点、欠点を踏まえ、送受信者間の平均ホップ数、ネットワーク中に発生するトラフィック量の総和を、転送効率の指標とし、Anycast RP (以降、Anycast RP は Anycast RP と MSDP を合わせたものとする。)、最短木、共有木、提案手法を比較する。また、保持される経路情報の総数について調べ、最短木、共有木と比較した提案手法の経路情報の大きさを示す。

^{注 9}The Network Simulator - ns-2
<http://www.isi.edu/nsnam/ns>

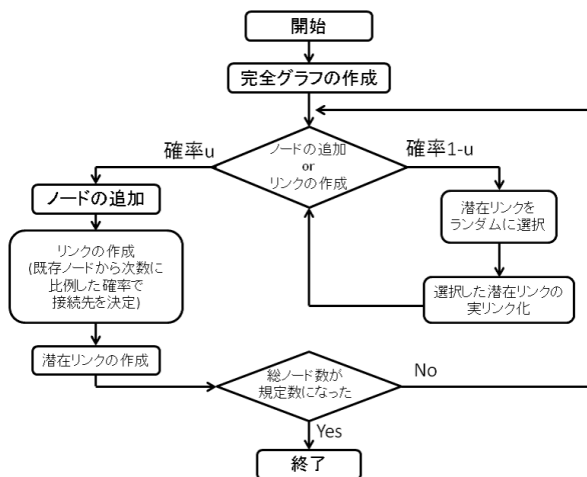


図 4: 実験ネットワークの作成フローチャート。

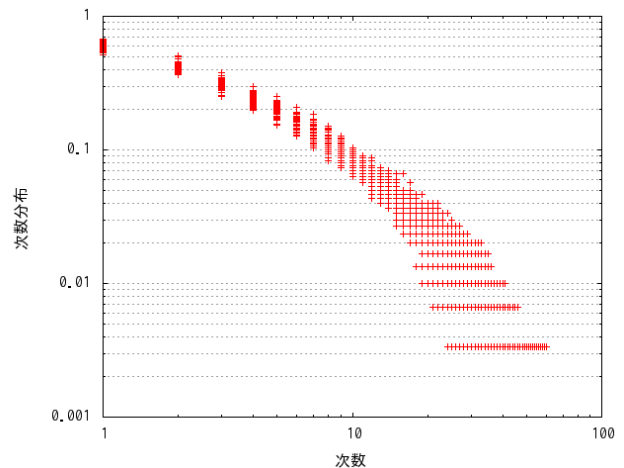


図 5: 実験で用いるネットワークの度数分布。

4.2. 実験環境

4.2.1. 実験に用いるネットワークについて

実験には、実ネットワークの持つ性質を備えたトポロジを元にしたランダムネットワーク上で行う。実ネットワークの持つ性質とは、スケールフリー性、スモールワールド性、クラスタ性の 3 つである [7]。

また実ネットワークはまとまったノードの群がいくつかあり、それらが主要なノードを介して繋がっている形である。本稿ではこのノードの群を島と呼ぶ。このようなネットワークを作成するために、BA モデル (Barabasi-Albert Model) [8]、CNN モデル (Connecting-Nearest Model) [9] のアルゴリズムを利用する。BA モデルはスケールフリー性、スモールワールド性を満たし、ネットワークの成長性とリンク結合の優先性を再現している。CNN モデルも同じく成長性を持つネットワークモデルであり、新規のノードは接続先の隣接ノードともつながりを持っている可能性が高いという傾向を再現している。

BA モデルでは最初に完全グラフネットワークを作成する。それからノードを追加し、度数 (ノードに接続されたリンクの本数) に比例した確率で既存のノードを選択してリンクを接続する。また CNN モデルでは、新しく追加されたノードが、接続先ノードに隣接するノードとの間に仮想のリンク (潜在リンク) を作成する。潜在リンクをランダムに選択して実在のリンクにする (実リンク化) ことでクラスタ性のあるネットワークを作る。本稿でもこれを利用し、図 4 の手段で複数の島が主要なノード同士で繋がっているようなランダムネットワークを作成する。完全グラフを構成するノードを主要なノードとし、それらの下に作成されるネットワークを一つの島とする。また CNN モデルによる実リンク化は複数の島に所属するノードが存在しないように行う。

4.2.2. C-RP の設定方法と共有木の RP の選出方法

C-RP は経路を作成するに当たり、RP やアクティブな RP として選出されて配送木の根となる重要なノードであるため、ネットワークの主要な位置に設定することが好ましい。しかし現状ではネットワーク管理者によって静的に設定されるため、設定時の明確な基準が存在しない。そこで本稿では C-RP の設定方法として、ネットワークの中心性を利用する。中心性とはそれぞれのノードがネットワーク中でどの程度中心にあるかを測るための指標であり、度数中心性、近接中心性、媒介中心性の 3 つがある [10]。

ネットワーク中の中心性の高いノードから順に C-RP として設定する。また C-RP を疎な位置に設定するため、各島の中で最も中心性が大きいノードを 1 つずつ C-RP として設定する。

なお、共有木については C-RP から選出された RP によって結果が大きく変わるため、小林らの研究で示された RP 選択手法を利用する。自身の度数と、隣接ノードの度数の総和が最大となる C-RP を RP として選出し、この RP を根とした共有木を比較対象とする。

4.3. シミュレーションの詳細

実験に使用するランダムネットワークについて、総ノード数 300 のネットワークを 100 パターン作成し度数分布を調べたところ図 5 のようになった。また平均パス長は 3.6 ~ 4.5、クラスタリング係数は 0.25 ~ 0.4 となっており、スケールフリー性、スモールワールド性、クラスタ性を満たす結果となっている。その他の詳しい実験パラメータについては表 2 に示す。表中の default とは NS2 の初期設定を指す。本稿では配送経路の作りに着目しているため、実験時のマルチキャストグループは 1 つとする。また C-RP の設定は度数中心性を元に行う。実験パラメータを元に作成したネットワークの一例を図 6 に示す。なお、以下に平均ホップ数、トラフィック量の総和、経路情報の総数を求めるシミュレーションの方法を示す。

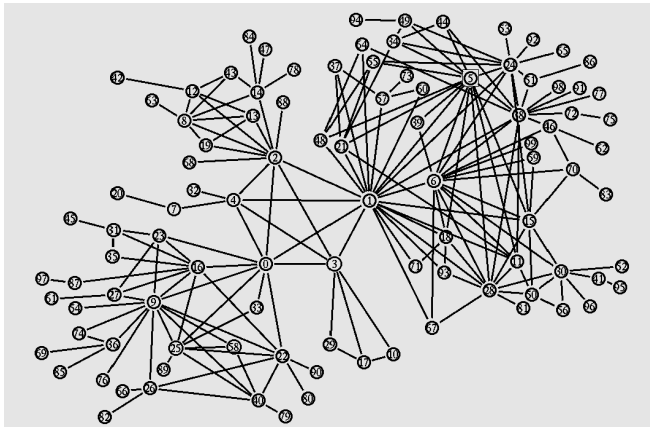


図 6: 実験で用いるネットワークの一例。

表 2: 実験パラメータ。

実験パラメータ	設定
総ノード数	100, 300, 500
島数	5
マルチキャストグループ数	1
図 2 における確率 u	0.5
パケットサイズ (byte)	180(default)
ビットレート (bps)	448000(default)
固定ビットレート送信時の送信開始時間 (秒)	1 ~ 5
固定ビットレート送信時の送信時間 (秒間)	1 ~ 10

● 平均ホップ数

ネットワーク中にランダムに送受信者を配置し、各手法（最短木、共有木、Anycast RP、提案手法）を元に配送木を構築する。構築された経路を元に、以下のような式で平均ホップ数 H を求める。

$$H = \frac{1}{\text{送信者数}} \sum_i \sum_j \frac{\text{送信者 } S_i \text{ から受信者 } R_j \text{ までのホップ数}}{\text{受信者数}}$$

シミュレーションは総ノード数、ネットワーク、送受信者の配置のパターンを変えて行う。送受信者は各島に 5 つずつ、ランダムな位置に配置する。ただし島の大きさにより配置できる送受信者数が 5 に満たない場合、その島の送受信者数は配置できた数となる。

またノード数を 300 とし、C-RP の設定方法を他の中心性を元にしたものに変えた場合の平均ホップ数の比較も行う。

● トラフィック量の総和

送信者がパケット送信を行った際にネットワーク中に発生したトラフィック量の総和を求める。トラフィック量とはあるリンクで転送されたデータ量を指す。全リンクで転送されたデータ量の総和をネットワーク中に発生したトラフィック量の総和とする。

実験は 2 種類行う。各送信者がパケットを 1 つずつ送信した場合にネットワーク中で発生するトラフィック量の総和を測る実験と、各送信者が固定ビットレートで配信を行った場合にネットワーク中で発生するトラフィック量の総和の時間推移を測る実験である。後者の実験では、ランダムに作成したパケット送信スケジュールを用いてトラフィック量の総和の時間推移を測る。なおパケット送信スケジュールは各手法に対して同一のものを使用する。

総ノード数は 300 とした。前者の実験では送受信者を各島に 5 つずつ、ランダムな位置に配置する。ただし島の大きさにより配置できる送受信者数が 5 に満たない場合、その島の送受信者数は配置できた数となる。後者の実験では送受信者を各島に 2 つずつ、ランダムな位置に配置した。またパケットのドロップは発生しないものとする。

● 経路情報の総数

ネットワーク中に送受信者をランダムに配置し、各手法を元に配送木を構築し、全ノードの保持する経路情報の総数を求める。このとき送信者数、受信者数を変化させ、経路情報の総数との相関を求める。総ノード数は 300 とし、送受信者はそれぞれ 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 50 と変化させる。また送信者数を変化させる場合の受信者数は 21、受信者数を変化させる場合の送信者数は 5 とした。

5. 実験結果と評価

5.1. 平均ホップ数の比較

表 3 は総ノード数（表中では Nodes と表記）を 100, 300, 500 とし、ネットワークの形と送受信者の配置を変えた場合の最短木、共有木、Anycast RP（表中では A-RP と表記）と提案手法の平均ホップ数の比較表である。括弧内の数値は最大ホップ数^{注 10}を示す。表では作成したランダムネットワーク（表中では NW と表記）をそれぞれ NW1 ~ 9 と表記し、それぞれ送受信者の配置を 3 パターン変えた結果を記している。

表 3 より提案手法は最短木よりは平均ホップ数が大きくなるが、共有木に対しては常に 1.0 以上平均ホップ数が小さくなり、Anycast RP と比較しても常に小さい値を示している。

また最大ホップ数についても常に共有木、Anycast RP 以下の値となっている。これよりネットワークの形や送受信者の配置によらず、共有木と Anycast RP に対する優位性を示せる。

また各手法の総ノード数別の平均ホップ数は、それぞれ同程度の値を取る。スモールワールド性を持つネットワークでは送受信者、C-RP、アクティブな RP の間などの任意の 2 ノードの経路は小さいホップ数で互いに到達できるため、このような結果が得られる。そのためスモールワールド性を持つネットワークであれば、ネットワークの規模によらず提案手法の優位性を示すことができる。

注 10 送受信者間が最長となる経路のホップ数。

表 3: 実験ネットワーク上での平均ホップ数の比較 .

Nodes	NW	共有木	A-RP	提案手法	最短木
100	NW1	7.00(10)	5.43(8)	5.32(8)	4.88(8)
		7.38(10)	5.79(9)	5.70(9)	4.96(8)
		6.86(10)	5.44(8)	5.44(8)	4.65(7)
	NW2	6.83(10)	5.85(9)	5.17(8)	4.77(7)
		7.11(10)	6.04(9)	5.94(9)	4.70(7)
		7.18(10)	6.44(9)	5.71(8)	4.80(7)
	NW3	7.02(10)	5.92(9)	5.14(8)	4.68(7)
		6.90(10)	6.06(9)	5.30(8)	4.57(7)
		7.12(10)	6.36(9)	5.53(9)	4.64(7)
300	NW4	7.27(10)	6.45(9)	5.76(9)	4.77(7)
		7.35(10)	6.40(9)	5.50(9)	4.79(7)
		7.45(10)	6.45(9)	5.67(9)	4.86(7)
	NW5	7.63(11)	6.52(10)	6.45(10)	5.04(8)
		7.68(11)	6.58(10)	6.16(10)	5.02(8)
		7.62(10)	6.61(9)	6.46(9)	4.86(7)
	NW6	7.62(10)	6.74(10)	5.87(10)	5.18(8)
		7.81(11)	6.79(11)	6.32(9)	5.30(9)
		7.61(11)	6.63(11)	5.75(10)	5.07(9)
500	NW7	7.63(10)	6.85(9)	5.54(9)	4.90(7)
		7.67(10)	6.70(9)	6.18(9)	5.08(7)
		7.68(10)	6.80(9)	5.36(9)	4.87(7)
	NW8	7.82(11)	6.81(11)	6.60(11)	5.16(8)
		7.68(10)	6.50(10)	6.31(10)	5.06(7)
		7.77(10)	6.90(10)	6.62(10)	5.08(7)
	NW9	7.81(10)	6.85(10)	5.93(10)	5.15(8)
		7.52(10)	6.84(10)	5.46(10)	4.76(8)
		7.67(10)	6.71(10)	5.09(9)	5.05(8)

また提案手法で RP 間配送木と、アクティブな RP を根とした共有木の両方に含まれるノードが存在しないネットワークの場合、提案手法と Anycast RP のパケット転送経路は同じであり、よって平均ホップ数も同じとなる。しかし両方に含まれるノードが増えるほど提案手法の平均ホップ数は Anycast RP より小さくなる。そのため Anycast RP と提案手法の平均ホップ数の差は一樣ではないが、必ず Anycast RP 以下になり優位性を示すことができる。

5.2. C-RP の設定方法と平均ホップ数の相関

各配送木による平均ホップ数に関連して、C-RP の設定方法と平均ホップ数の関係を調べる。表 4 は同一のネットワーク中で C-RP の設定方法として各中心性を用い、送受信者の配置を変えた場合の結果である。送受信者の配置は表では同一の配置に対してそれぞれ 1 ~ 6 の ID を振る。

提案手法は C-RP の設定方法によらず、最短木より平均ホップ数が大きく、共有木・Anycast RP より平均ホップ数が小さい。また最大ホップ数も常に最短木以上、共有木・Anycast RP 以下となっている。ただし各中心性による明確な平均ホップ数の変化は見受けられない。これより、C-RP をネットワーク中の中心性の高いノードに設定するならば、C-RP の設定に用いる方法の違いによらず共有木、Anycast RP に対して優位性を示すことができる。

表 4: C-RP 設定方法別の平均ホップ数 .

中心性	ID	共有木	Anycast RP	提案手法	最短木
次数 中心性	1	7.27(10)	6.45(9)	5.75(9)	4.77(7)
	2	7.35(10)	6.40(9)	5.50(9)	4.79(7)
	3	7.45(10)	6.45(9)	5.67(9)	4.86(7)
	4	7.36(10)	6.63(9)	5.89(9)	4.92(7)
	5	7.45(10)	6.54(9)	5.76(9)	4.92(7)
	6	7.55(11)	6.45(10)	5.78(10)	5.10(8)
近接 中心性	1	7.27(10)	6.49(9)	5.63(9)	4.77(7)
	2	7.35(10)	6.55(9)	5.45(9)	4.79(7)
	3	7.45(10)	6.54(9)	5.59(9)	4.86(7)
	4	7.36(10)	6.72(9)	5.98(9)	4.92(7)
	5	7.45(10)	6.59(9)	5.62(9)	4.92(7)
	6	7.55(11)	6.49(9)	5.65(9)	5.10(8)
媒介 中心性	1	7.27(10)	6.57(9)	5.29(9)	4.77(7)
	2	7.35(10)	6.64(9)	5.23(9)	4.79(7)
	3	7.45(10)	6.61(9)	5.39(9)	4.86(7)
	4	7.36(10)	6.79(9)	6.04(9)	4.92(7)
	5	7.45(10)	6.66(9)	5.67(9)	4.92(7)
	6	7.55(11)	6.57(9)	5.70(9)	5.10(8)

5.3. トラヒック量の総和と時間推移

図 7 は複数の送信者が同サイズのペケットを 1 つずつ送信してネットワーク中に発生したトラヒック量の総和を求める実験を 50 回行い、提案手法のトラヒック量の総和が昇順になるように並べ変えてネットワーク ID を振り、各手法の結果を示したものである。トラヒック量の総和は Anycast RP、共有木、提案手法、最短木の順に大きい値をとる。

送受信者数は 5 つの島に 5 つずつの最大 25 であり、島の大きさにより配置できた数が 5 未満になることがある。トラヒック量の総和が少ないネットワークほど送信者を配置できた数が少ない、つまり島の大きさに偏りがあることを示している。

小林らの RP 選択手法では共有木の RP はノードの次数に依存するため、大きい島の C-RP ほど選出されやすい。送受信者は大きい島に偏って多く存在するため、全送受信者のうち、共有木の RP とのホップ数が小さいノードが多くの割合を占める。それにより発生するトラヒック量の総和も小さくなる。

しかし図 7 ではトラヒック量の総和の大小によらず、提案手法のトラヒック量の総和は共有木のトラヒック量の総和より小さい。そのため提案手法は送受信者の位置関係による影響に関わらず、共有木と比較してトラヒック量の総和を減らすことができる。

Anycast RP は RP 間の通信でユニキャスト通信を行っているため、他 3 つの配送木に比べトラヒック量の総和が大きくなる。また 5.1 節で述べた経路の関係から Anycast RP のトラヒック量の総和が提案手法以下になることはない。

図 8 は、表 2 の固定ビットレート送信における送信時の送信開始時間、送信時間の数値の範囲でランダムに作成したパケット送信スケジュールに従って複数の送信者が固定ビットレート送信を行った際のトラヒック量の総和の時間推移を示している。各配送木のトラヒック量の総和の変動はほぼ同じタイミングに発生し、

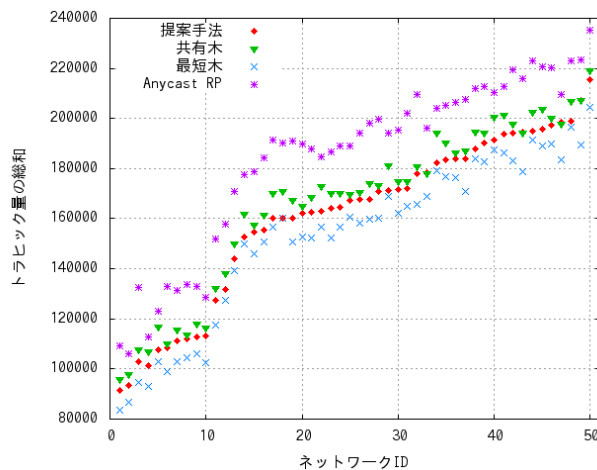


図7: ネットワーク中に発生するトラフィック量の総和。

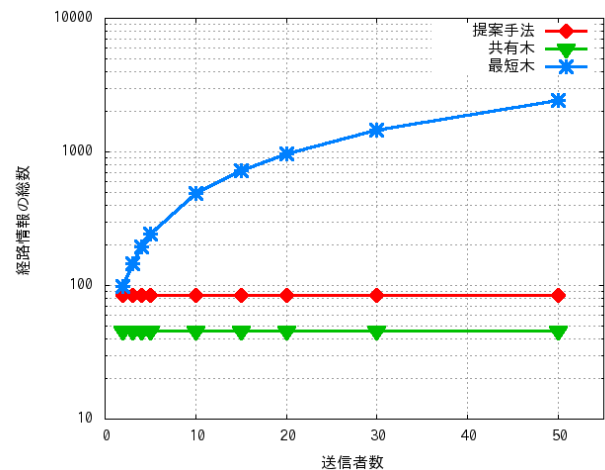


図9: 送信者数と経路情報の総数の相関。

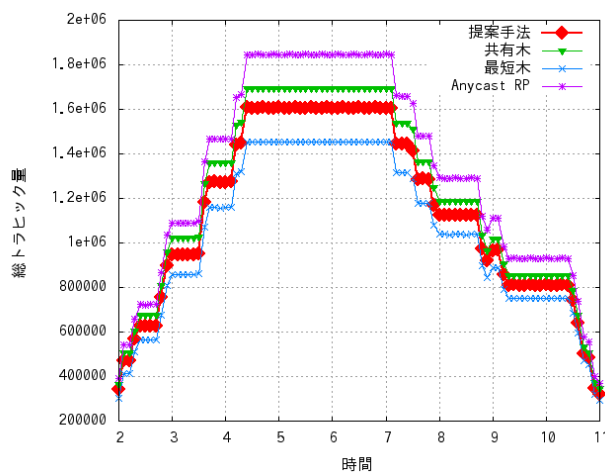


図8: ネットワーク中に発生するトラフィック量の総和の時間推移。

変動幅に差があるため、シミュレーション中のどの時間においても常に Anycast RP、共有木、提案手法、最短木の順に大きいトラフィックが発生している。これより提案手法の共有木、Anycast RP に対する優位性を示せる。

5.4. 経路情報の総数と送受信者数の相関

図9は送信者数と経路情報の総数の相関を示している。送信者数が増えるほど最短木の経路情報が多くなるが、共有木と提案手法は一定であるという結果が得られた^{注11}。そのため送信者数の増加に対して提案手法は経路情報の総数を少なく維持できている。

共有木と提案手法の差については、提案手法において構築される RP 間配送木の経路情報が影響している。グループが1つの場合、各配送木のノードごとの経路情報の最大数は表5のように示すことができる。提案

表5: ノードごとの経路情報の最大数。

配送木	経路情報の数	経路情報の数が最大となるノード
共有木	1	経路上のノード
最短木	送信者数	受信者の直近 ネットワーク中の主要なノード
提案手法	$1 + (C-RP \text{ 数} - 1)$	ネットワーク中の主要なノード

手法の場合、アクティブな RP は自分以外の C-RP を根とした最短木に参加するため、RP 間配送木の経路上のノードは最大で C-RP の数だけ経路情報を多く保持することになる。これが共有木との経路情報の総数の差となる。ただし受信者数が固定である限りは送信者の数によらず経路情報の総数は一定であり、最短木と共有木の経路情報の総数を加味すると、提案手法における経路情報の総数も十分に少ない値である。

次に、図10は受信者数と経路情報の総数の相関を示している。全ての配送木において受信者が増えるにつれて経路情報の総数が単調増加していることがわかる。これは新しい受信者が増える度に既に存在する配送木にその受信者への経路が追加されるためである。このとき共有木と提案手法では1つの配送木に経路が追加されるが、最短木では最短木全てに経路の追加が発生するため経路情報の増加量及びネットワーク中で保持される経路情報の総数が非常に多くなる。これより受信者が多い環境であるほど最短木に比べて提案手法の経路情報の総数が抑えられる。

また提案手法の場合、受信者の発生により新しい C-RP がアクティブな RP となった場合、RP 間配送木に経路が新しく加えられ、経路情報が増える。そのため図の受信者数2~30地点では提案手法の経路情報の総数は共有木より増加量が多い。しかし RP 間配送木の数は最大でも C-RP の数と同等に収まる。そのため全ての C-RP がアクティブな RP になって以降の増加量は受信者数30~50の場合のように共有木の増加量と

注11 この実験では全ての C-RP がアクティブな RP として振る舞っている。

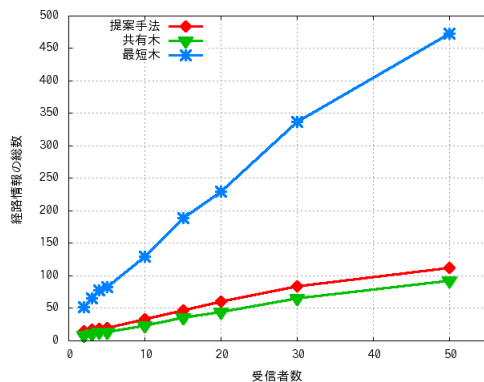


図 10: 受信者数と経路情報の総数の相関。

ほぼ同等になる．C-RP の数は管理者により静的に設定されるため固定である．本稿では各島 1 つずつの計 5 つの C-RP を設定している．これは十分に少ない値である．そのため C-RP の数が少なければ，提案手法の経路情報の総数も少ない値に収まる．また送信者を変化させた場合の実験結果から同数の受信者に対する提案手法の経路情報の総数は十分に少ないため，受信者が変化した場合でも同様のことが示せる．

これらより，提案手法の経路情報の数は共有木の経路情報の数に近く，十分に少ないといえる．

6. むすび

本稿ではマルチキャスト通信の今後の需要と，主に使用される配送木の欠点に着目した．共有木の耐障害性の問題解決として，Anycast RP と MSDP を用いた RP 冗長化手法が提案されているが，多数の送受信者が存在するマルチキャストネットワーク上で運用する場合，一般的な MSDP による RP 間通信では転送効率に課題が残る．特にこの課題は今後，1 つのマルチキャストネットワーク中のノード数が増大したり，複数の AS を跨ぐようなマルチキャストネットワークで運用された場合，特に顕著な問題となる．

そこで提案手法として，RP 間通信を最短木で行う手法を提案した．

実験は NS2 上で行い，現実のネットワークの持つ性質を備えたランダムネットワークを用いた．転送効率における評価指標として平均ホップ数，トラフィック量の総和について調べ，既存の MSDP を用いた場合の Anycast RP，最短木，共有木との比較を行った．また，提案手法における経路情報の総数を調べ，最短木，共有木との比較を行った．結果，転送効率の面において，提案手法は既存の Anycast RP より優位であるという実験結果が得られた．また最短木，共有木と提案手法の経路情報の総数の比較を行い，提案手法の経路情報の総数が十分少ない値であることを示した．

参考文献

[1] D.Farinacci, Y.Cai, " Anycast-RP using Protocol Independent Multicast(PIM) ", The Internet

Engineering Task Force, Request for Comments 4610, pp.1-12, 2006.

- [2] D.Meyer, " Multicast Source Discovery Protocol (MSDP) ", The Internet Engineering Task Force, Request for Comments 3618, pp.1-19, 2003.
- [3] B.Fenner, M.Handley, H.Holbrook, I.Kouvelas, "Protocol Independent Multicast - Sparse Mode(PIM-SM):Protocol Specification(Revised)", The Internet Engineering Task Force, Request for Comments 4601, pp.1-150, 2006.
- [4] T.Hardie, " Distributing Authoritative Name Servers via Shared Unicast Addresses ", The Internet Engineering Task Force, Request for Comments 3258, pp.1-19, 2002.
- [5] 小林元太, 松澤智史, 武田正之, " 共有トリーにおける全受信者までの合計ホップ数を最小にするランデブーポイント選択法 ", 電子情報通信学会論文誌, vol.J92-B, no.10, pp.1643-1651, 2009.
- [6] B.Cain, H.Holbrook, "Source-Specific Multicast for IP", The Internet Engineering Task Force, Request for Comments 4607, pp.1-19, 2006.
- [7] 増田直紀, " 複雑ネットワークの研究動向について (<特集>複雑ネットワークの世界 - ネットワーク研究の新展開 -) ", オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, vol.59, no.9, pp.511-516, 2008.
- [8] A.Barabasi and R.Albert, " Emergence of scaling in random networks", Science, vol.286, no.5439, pp.509-512, 1999.
- [9] A. Vazquez, "Growing network with local rules: preferential attachment, clustering hierarchy and degree correlations", Physical Review E, vol.67, 056104, 2003.
- [10] 池田真一, 鈴木智也, " 複雑ネットワークシステムにおけるノードの中心性と予想精度の関係 ", 電子情報通信学会技術研究報告. NLP. 非線形問題, vol.107, no.477, pp.19-24, 2008.