マルチキャストパケットの配送木に求められる性質について*

庄山 尚芳† 山本 和彦‡ 平原 正樹§

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科¶

概要

近年，一対多数の通信モデルを実現するマルチキャストの有効性が認められるようになり，広く研究が行なわれるようになった．マルチキャストパケットの転送は，グループのメンバーを網羅した木(配送木)を構築し，配送木の上でパケットを拡散する事によって実現される．すなわち，マルチキャストにおける経路制御は「どのような配送木をいかに構築するのか」という問題に帰着される．本稿では，マルチキャストの経路制御における配送木の性質に着目し議論を行う．マルチキャストの有効性を引き出すには「グループごとに，グループの性質に最も適した経路制御方策を，自由に選択可能にする必要性」があるが，既存のマルチキャスト経路制御方式では実現できない事を述べる．次にこの考察を受け，マルチキャスト QoS の提案を行い，マルチキャスト QoS からマルチキャスト経路制御への対応付けに対する我々の案を述べる．

1 はじめに

インターネットで用いられている通信プロトコル IP は，一対一通信 (ユニキャスト) と一対全通信 (ブロードキャスト) を基礎としたものであったが，1980 年代後半 IP を一対多通信 (マルチキャスト) に対応させる試み (IP-Multicast[1]) が S. Deering らによって開始された．現在では，インターネット上に (トンネリング技術を用いた) マルチキャスト仮想ネットワーク MBone が世界中に張りめぐらされ，広く利用されるようになった．

マルチキャストはグループ通信機能を提供するので，マルチキャストはグループ通信を行うアプリケーションに有効である．たとえば，近年インターネット上では，音声会話ツールや画像通信ツールなどのグループ通信ツールを用いて，遠隔会議・講演の放送などが頻繁に行われている [2]．また，インターネットに関する統計 [3] によると，現在のインターネットでは，ネットワークニュースの配送・一般に公開されたデータの配布・メイリングリストなど，グループ通信に適したデータ転送が高い割合を占めている．

これらのグループ通信は，マルチキャストを用いることによって効率的に行うことができる．仮にこれらの通信をユニキャストを用いて実現すると，リンクにデータが重複して流れることが多く非効率である．またブロードキャストを用いた実現では，データ転送の必要がないリンクにまでデータが流れることになり非効率である．これに対し，マルチキャ

---

*"Required properties for multicast packet distribution tree."

†Hisayoshi Shoyama
hisayo-s@is.aist-nara.ac.jp
‡Kazuhiko Yamamoto
kazu@is.aist-nara.ac.jp
§Masaki Hirabaru
hi@is.aist-nara.ac.jp
¶Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, Japan

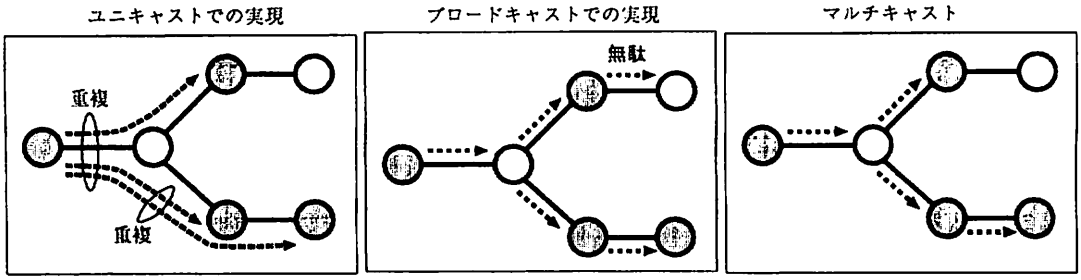


図 1: マルチキャスト

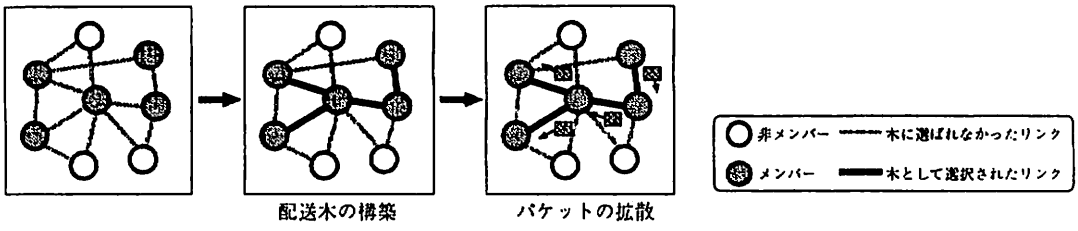


図 2: マルチキャスト経路制御

ストでは，分岐が必要なノードでパケットが複写されてグループのメンバーへと転送されるので，上記のような非効率が発生することなくパケットを配送することができる (図 1).

ネットワーク通信においては，効率の良い経路制御が求められる．しかしながら，マルチキャストの経路制御は，ユニキャストの経路制御に比べ歴史が浅く，研究の余地が多く残されている．マルチキャストの経路制御は，送信者からマルチキャストグループ宛に発せられたパケットを，その時点でグループに参加している全てのメンバーへ届けられるように，経路を決定することである．これは，マルチキャストグループのメンバーを網羅した木 (配送木) を構築し，その配送木の上でパケットを拡散することによって実現することができる．すなわち，マルチキャストにおける経路制御は「どのような配送木をいかに構築するのか」という問題に帰着される (図 2).

本稿では，配送木の性質に着目して既存のマルチキャスト経路制御方式の問題点を指摘し，その解決策としてマルチキャスト QoS を定義する．

まず 2 章では，既存のマルチキャスト経路制御方式を，配送木の性質に着目して説明・考察を行い，既存の方式ではユーザの要求を満足させることが困難であることを述べる．3 章では，ユーザがマルチキャスト経路制御に要求する際に利用する QoS パラメータの提案を行い，次に，ユーザから指定された QoS パラメータを実際の経路制御に反映する手段について述べる．4 章でまとめを行ない，今後の課題を述べる．

2 配送木はどうあるべきか？

この章では，まず既存のマルチキャスト経路制御方式の考察を行い，既存の方式の問題点を示す．次に，マルチキャスト経路制御に対する要求を述べる．

2.1 既存の方式の考察

この節では，既存のマルチキャスト経路制御方式を木の性質に着目して考察を行う．

RPM

RPM (Reverse Path Multicasting)[4] は，ユニキャストの経路情報を流用し，マルチキャストを実現する方式である．ユニキャストでは，各ネットワークに対し最短経路の全域木を構築する．この全域木を逆向きに辿れば，ブロードキャストを実現できる．RPM は，ユニキャストの全域木を配送木として (逆向きに) 利用し，この木に対してグループのメンバー存在状況に応じ，枝刈り・継ぎ木を行うことによって，マルチキャストを実現する．

RPM では，パケットの送信者に依存して配送木が異なる．また，配送木の性質は最短経路木に限定されている．

このような，送信者によって配送木が異なる経路制御方式を，本稿では始点型の経路制御と呼ぶ．

MOSPF

MOSPF (Multicast Extentions for OSPF) [6] は，ユニキャストの経路制御プロトコル OSPF (Open Shortest Path First) をマルチキャストへ拡張したプロトコルである．MOSPF では，リンク情報に加えて，リンクにおけるメンバーの存在状況もルータ間で交換する．これにより，全ルータは管理領域内での全てのグループのメンバーの存在分布を知り，この情報をもとに送信者からグループの全メンバーへの最短経路木を計算し，マルチキャストパケットの配送木として用いる．

すなわち，MOSPF は始点型の経路制御方式であり，配送木の性質は送信者からの最短経路木である．

CBT

CBT (Core Based Tree)[7] は，マルチキャストグループごとに中心となるルータ (コアルータ) を定め，グループのメンバーが生じたときに，メンバーが発生したホストからコアルータへの最短経路を既存の配送木に継ぎ木することによって，配送木を構築する．

CBT では，グループ間で一本の配送木を共有しており，配送木の性質はコアを中心とした最短経路木に限定されている．

このような，送信者に依存せずグループで一つの木を共有する経路制御方式を，本稿では共有型の経路制御と呼ぶ．

PIM (sparse mode)

PIM (Protocol Independent Multicast) [8][9] は，共有木と始点木の両方が利用できる方式である．まず，受信者は RP (Rendezvous Point) と呼ばれるノードに向かって参加要求を出す．この際継ぎ木が行われる．また，送信者は RP へ向かって登録要求を送り，それに応じて RP から 送信者へと継ぎ木が行われる．この結果，送信者と受信者を結ぶ経路が確立される．この木は，送信者に依存しない RP を中心とした共有木となっている．また，低遅延を期待する場合，この共有木から，始点木に移行することが可能である．受信者は，送信者へ向かって参加要求を送信して，最短経路の継ぎ木を行う．最短経路の継ぎ木が完了し，パケットが最短経路から流れ始めると，それを検出したルータが枝刈り要求を出し，RP への経路を枝刈りする．

すなわち，PIM (sparce mode) は，木の構築時には RP を中心とした最短経路の共有木を用いるが，後に送信者から最短経路の始点木に移行することが可能である．

TMC (我々の方式)

我々は，TMC というマルチキャスト経路制御の枠組みを考案した [11]．TMC は次の考察をもとに設計された．

広域性　始点型の経路制御では，送信ホストとグループの組により経路制御を行わなければならず．経路制御のために，$O(N_{source} \times N_{group})$ の情報を持つ必要がある．(ここで，N_{source} は送信ホストの数，N_{group} はグループの数)　これに対し共有型の経路制御では，

RPM	始点型，送信者からの最短経路木
MOSPF	始点型，送信者からの最短経路木
CBT	共有型，あるノードからの最短経路木
PIM	共有型，あるノードからの最短経路木 ⇒ 始点木，送信者からの最短経路木
TMC	共有型，あらゆる種類の共有木

表 1: 既存の経路制御方式における配送木の性質

送信ホストの数には依存しない．$O(N_{group})$ したがって，共有型の経路制御方式のほうが広域性が高い．

トラフィックの集中　共有型の経路制御では，グループ宛のパケットは同一の配送木を用いて配送されるので，トラフィックの集中が問題になる．始点型の経路制御では，配送木は送信者によって異なるので，トラフィックの分散が期待できる．しかしながら，現実の広域ネットワークにおける冗長経路数は高々 2 ～ 5 程度であるので，大した分散は期待できないと思われる．したがって，共有型の経路制御を用いたとしてもトラフィックの集中は，さほど問題ではないと考えられる．

遅延　始点型では，送信ホストから全受信者への経路を最短にすることが可能なので，低遅延での配送を期待できる．これに対し，各ノードから他の全てのメンバーへの経路を最短とする共有木は一般に存在しないので，共有型では遅延が大きくなる欠点がある．

転送にかかるオーバーヘッド　共有型では，転送時に宛先アドレスさえ参照すればよいので，転送にかかるオーバーヘッドが小さいが，始点型では宛先アドレスに加え，送信者アドレスとの組で経路制御表を検索しなければならないので，オーバーヘッドが大きい．ネットワークが高速化するとルータでの処理がボトルネックになるので，ルータでの転送メカニズムはできる限りシンプルにする必要がある．ゆえに，オーバヘッドが小さい共有型が有利である．

インターネットは目覚しい発展を続けているので広域性は特に重要であるし，ネットワークの高速化に追従するためにも，共有木を使う必要があると考えられる．残念ながら，共有型にはトラフィック集中の問題があるが，現実のネットワークトポロジでは，始点木を用いた場合と比較しても，集中の程度はたいして大きくない．また，遅延の問題は，共有木をうまく選ぶことで，ある程度補うことが可能だと考えられる．

TMC は，以上の考察を受け共有型の経路制御を採用した．また，木の性質は限定せずあらゆる種類の共有木を利用できる．

2.2 既存の経路制御方式の限界

前節で説明した既存のマルチキャスト経路制御方式をまとめたものが，表 1 である．上 4 つは，いずれも送信者またはコアを中心とした最短経路木を用いているので，送信者またはコアから受信者までの遅延の最小化は期待できるが，これらの方式では，遅延以外のパラメータは全く考慮されていない．TMC は，共有木であればいかなる性質の木でも利用可能であるが，始点木は全く利用できない．

たとえば，リアルタイム性が必要で遅延を重視したいアプリケーションと，リアルタイム性は必要ないが転送量が大きいので消費コストの低減を重視したいアプリケーションの両方を動かしたい場合を考えよう．前者は最短経路木を構築する始点型の経路制御方式 (た

とえばRPM, MOSPF) を，後者は最小コスト木を利用可能な経路制御方式 (TMC) を利用すれば満足できる．しかしながら，この二つの要求を同時に満たすのは既存の方式で不可能である．

すなわち，既存のマルチキャスト経路制御方式は，全てのアプリケーションに単一の御仕着せの経路制御方策を強いているので，経路制御方策に対するアプリケーションからの相異なる複数の要求を，同時に満足させることができないという問題点 (限界) がある．

2.3 マルチキャスト経路制御への要求

マルチキャストは様々な応用に有効な技術であるが，(前述の例からもわかるように) マルチキャストを利用する応用ごとに最適な経路制御方策がさまざまに異なる．したがって，マルチキャストの有効性を引き出すためには，アプリケーションからの多様な要求に応じて，経路制御方策を選択できる枠組みが必要である．

我々は，マルチキャストグループごとに経路制御方式を選択可能にすれば，上記の要求を満たすことができると考えている．(なお，一つのグループの中で，性質の異なるアプリケーションを複数利用する場合には，それぞれに別のアドレスを使うようにする必要が生まれるが，これは本質的な問題ではない．)

3 マルチキャストにおける QoS

2.3 節で述べた要求を実現するためには，次の三つの実現が必要だと考えられる．

- メンバーがマルチキャスト経路制御方策の要求を行う際に使用するパラメータ (マルチキャスト QoS)
- グループの各ユーザから出される QoS を調停ポリシー
- 調停された QoS の，マルチキャスト経路制御への反映

メンバーの要求がマルチキャスト経路制御に反映されるまでの流れは，次の通りである．まず，グループのメンバーは，マルチキャスト経路制御への要求をマルチキャスト QoS パラメータを用いて指定する．メンバーから指定された QoS パラメータは，調停ポリシーにしたがって調停され，調停された QoS がマルチキャスト経路制御に反映される．

次節からは，この 3 点に対する我々の実現案を述べる．

3.1 QoS パラメータ

マルチキャスト通信を特徴づける QoS には，次のパラメータが考えられる．

マルチキャストには複数のメンバーが存在という特徴があるので，マルチキャストの QoS には，ユニキャスト QoS では現れなかったパラメータが必要になる．

delay {minimize, don't_care}
: 通信において，遅延を重視するかどうかを指定するパラメータ．遅延を小さくしたい場合は minimize を指定する．

cost {minimize, don't_care}
: データ転送において，ネットワーク全体で消費される資源の最小化を望むかどうかを指定するパラメータ．コストの最小化を望む場合は minimize を指定する．

num_sender {all, some, only_one}
: グループに存在する送信者の数に関するパラメータ．グループのメンバー全てが送信を行う場合 all，(全てではない) 複数のメンバーが送信を行う場合 some，送信者が唯一の場合 only_one を指定する．

simul_sender {all, some, only_one}
: グループ中で，同時に送信を行うホスト数に関するパラメータ．全ての送信者が同時に送信を行う場合には all，(全てではない) 複数の送信者が同時に送信を行う場合には some，同時に送信を行う

delay	cost	num_sender	simul_sender	配送木
×	(any)	only_one	(any)	共有型，最小コスト
		some, all	only_one	
			some, all	始点型，(最短経路木)
○	×	only_one	(any)	共有型，送信者からの最短経路木
		some, all	(any)	始点型，各送信者からの最短経路木
	○	(any)	(any)	(特殊な場合を除き，満たせない)

(但し，○ は minimize，×は don't_care を意味している．)

表 2: QoS パラメータの配送木への対応

ホストが唯一の場合は only_one を指定する．

member_distribution {dense, sparse}
どのようなメンバー分布のグループで通信を行いたいのかを指定するパラメータ．メンバーが密に分布するグループでは dense，疎に分布するグループでは sparse を指定する．

3.2 QoS 調停ポリシーの選択

グループのメンバーからの QoS 要求は，それらが全て一致しているとは限らない．グループ中の複数のメンバーが，それぞれ異なった要求をすることも考えられる．しかしながら，一つのグループには一つの QoS を対応付ける必要があるので，QoS パラメータの調停が必要となる．

グループの性質を反映するためには，調停に用いるポリシー (たとえば，変更は認めない，第一メンバーの要求を優先，送信者の意見を優先，全メンバーの要求は平等に扱うなど..) を，グループごとに選択可能にするべきである．調停ポリシーは，グループの第一メンバーがグループの構成時に選択を行うようにすればよい．

具体的な QoS 調停メカニズムの設計は，今後の課題である．

3.3 QoS から経路制御への対応付け

前節で提案したマルチキャストの QoS パラメータは，マルチキャスト経路制御における (1) 配送木の種類の選択，(2) 配送木の構築に用いるプロトコルの選択 に利用できると考えている．

配送木の種類への対応

QoS パラメータのうち delay, cost, num_sender, simul_sender パラメータは，配送木の種類を決定するのに使うことができる．

これらのパラメータから経路制御への対応付けを行うに当たり，我々は次の考え方を適用し，結果として表 2 に示す対応が得られた．

- 遅延の最小化が求められている場合，送信者からの最短経路木を配送木として用いる．(最短経路を選択することによる遅延の低下を期待．)
- 遅延の最小化が求められていなければ，配送木には最小コスト木を用いる．
- 複数の送信者が同時に送信する場合は，たとえコストの最小化が求められていても，トラフィックの集中を低減するために，始点型の経路制御を採用する．
- 同時に送信するのがただ一つの場合，共有型，始点型のどちらでも選択可能ではあるが，共有型の経路制御を選択する．

これは，共有型の経路制御がより処理が軽いからである (2.1 節参照).

- `delay`, `cost` の両方を最小化するのは通常不可能なので，エラーを返すか，どちらか片方だけの最小化を行う．(これは，実装しだいである．)

マルチキャスト QoS パラメータにしたがって，マルチキャスト経路制御における配送木の種類を選択することが重要である．

木構築プロトコルへの対応

`member_distribution` パラメータは，配送木構築プロトコルの選択に用いることができる．`dense` の場合，グループのメンバーが存在するとの仮定の下に木の構築を行う．`sparse` の場合は，逆に，グループのメンバーは存在しないとの仮定の下に木の構築を行う．メンバー分布に関し，このような仮定を置くことによって，木の構築のために必要なトラフィックを減らすことが可能となる．なお，既存の経路制御方式 RPM は前者，PIM (sparse mode) は後者に当てはまる．

4 おわりに

マルチキャストは様々な応用に有効な技術であるが，既存の経路制御方式は全ての応用に御仕着せの経路制御方策を強いているため，その有効性を十分に引き出しきれていなかった．本稿では，グループごとに経路制御方策を選択可能とする必要性を述べ，そのために必要となるマルチキャスト経路制御 QoS パラメータの提案と，QoS パラメータをマルチキャスト経路制御に反映する手段の提案を行った．

本稿では，“マルチキャスト経路制御に QoS を採り入れる” という新しい考え方を提案した．

今後は，本稿で提案した考え方の評価や実装を行い，本稿で提案した QoS パラメータが必要十分であることや，QoS のマルチキャスト経路制御への対応が適切であることを実証して行きたい．

謝辞

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 荒木研究室 大規模高速分散システムグループの皆さんを始めとして，日頃から貴重な助言を頂いている皆様に深く感謝します．

参考文献

[1] S. Deering: “Host Extensions for IP Multicasting”, STD 5, RFC 1112, Stanford University, Aug. 1989.

[2] M. R. Macedonia, D. P. Brutzman: “MBone Prevides Audio and Video Across the Internet”, IEEE COMPUTER, pp.30–36, April 1994.

[3] “NSFNET Backbone Traffic Distribution by Service ”, ftp://NIC.MERIT.EDU /nsfnet/statistics/1994/nsf-9408.ports, August, 1994.

[4] S. E. Deering, and D. R. Cheriton: “Multicast Routing in Datagram Internetwork and Extended LANs” ACM Transactions on Computer Systems, Vol.8, No.2, pp. 85–110, May. 1990.

[5] Waitzman, D., Partridge, C., and Deering, S.: “Distance Vector Multicast Routing Protocol”, RFC 1075, BBN STC, Nov. 1988.

[6] J. Moy: “Multicast Extensions to OSPF ”, RFC1584, Proteon Inc., March 1994.

[7] A. J. Ballardie, P. F. Francis, and J . Crowcroft: “Core Based Trees”, In Proceedings of the ACM SIGCOMM, San Francisco, 1993.

[8] S. Deering, D. Estrin, D. Farinacci, V. Jacobson, C. Liu, and L. Wei: "Protocol independent multicast (PIM): Motivation and Architecture.", *Internet Draft*, March 1994.

[9] S. Deering, D. Estrin, D. Farinacci, V. Jacobson, C. Liu, and L. Wei: "Protocol independent multicast (PIM), sparse mode protocol : Specification.", *Internet Draft*, March 1994.

[10] S. Deering, D. Estrin, D. Farinacci, V. Jacobson: "Protocol independent multicast (PIM), dense mode protocol : Specification.", *Internet Draft*, March 1994.

[11] 庄山尚芳: "共有木を用いたマルチキャスト経路制御", 卒業論文, 九州大学工学部情報工学科, 1994 年 2 月.