

特別研究報告

題目

IPv6 エニーキャストルーティングプロトコル PIA-SM の設計および実装

指導教官

村田 正幸 教授

報告者

松永 怜士

平成 16 年 2 月 19 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

平成 15 年度 特別研究報告

IPv6 エニーキャストルーティングプロトコル PIA-SM の設計および実装

松永 怜士

内容梗概

IPv6 の持つ新たな機能の一つとしてエニーキャスト通信がある。エニーキャスト通信を実現するために規定されているエニーキャストアドレスは、特定の機能(サービス)に対して割り当てられるアドレスであり、クライアント側はエニーキャストアドレスを指定するだけで、対応する機能を提供する複数のサーバの中から最適なサーバと自動的に通信することができる。

しかし、この最適なサーバにパケットを転送するルーティングプロトコルは現状では存在せず、現在のエニーキャスト通信の利用は非常に限られている。

そこで本報告では、ネットワーク上の任意の場所にサーバが存在する場合に必要なとなる、エニーキャストルーティングプロトコルの設計および実装を行う。特に、エニーキャスト通信とマルチキャスト通信との類似性に着目し、既存のマルチキャストルーティングプロトコルの一つである PIM-SM を修正した、新たなエニーキャストルーティングプロトコル: PIA-SM の実装を行う。

さらに、PIA-SM を実装したノードを用いた実験により、エニーキャストアドレスを用いることで自動的に複数のサーバの中の 1 台へとパケットが転送されることを確認した。

キーワード

IPv6 (Internet Protocol version 6), エニーキャストアドレス, エニーキャストルーティングプロトコル, PIM-SM (Protocol Independent Multicast - Sparse Mode), MLD (Multicast Listener Discovery)

目次

1	はじめに	5
2	エニーキャストルーティングプロトコル PIA-SM	7
2.1	PIM-SM プロトコルの概要	7
2.1.1	隣接 PIM ルータの発見	9
2.1.2	ランデブーポイントツリーの構築	9
2.1.3	マルチキャストパケットの転送	11
2.2	PIA-SM プロトコルの概要	13
2.2.1	隣接 PIA ルータの発見	17
2.2.2	ランデブーポイントツリーの構築	17
2.2.3	エニーキャストパケットの転送	19
2.3	PIA-SM プロトコルの詳細設計	21
2.3.1	指名ルータの決定	21
2.3.2	エニーキャストレシーバの探索	24
2.3.3	ルーティングテーブルへの登録	31
2.3.4	パケットの転送	37
3	PIA-SM プロトコルの実装と動作確認	40
3.1	FreeBSD 上での PIA-SM プロトコルの実装	40
3.2	FreeBSD 上での PIA-SM プロトコルの動作確認	43
4	おわりに	48
	謝辞	49
	参考文献	50

目次

1	PIM-SM の概要	8
2	隣接 PIM ルータの発見	10
3	ランデブーポイントツリーの構築	11
4	マルチキャストパケットの転送	12
5	PIA-SM の概要	16
6	PIA ルータによるランデブーポイントツリーの構築	18
7	エニーキャストパケットの転送	20
8	PIA Hello メッセージのフォーマット	23
9	指名ルータの選択	24
10	ARD メッセージのフォーマット	28
11	NDP キャッシュのエントリ作成	29
12	同一セグメント上の経路選択	30
13	NDP キャッシュのエントリ削除	31
14	ユニキャストルーティングテーブルのエントリ作成	33
15	ユニキャストルーティングテーブルのエントリ削除	35
16	他のエニーキャストレシーバへの経路変更	36
17	PIA Join/Prune メッセージのフォーマット	37
18	ユニキャストルーティングに基づくエニーキャストパケットの転送	38
19	PIA Capsule メッセージのフォーマット	39
20	PIA-SM ルータ実装のモデル図	42
21	実験環境	44
22	ARD メッセージによるセグメント上のエニーキャストパケットの転送結果	46
23	複数台のルータによるエニーキャストパケット転送の結果	47

表目次

1	エニーキャスト通信と他の通信の性質の比較	14
2	PIA ルータの状態遷移	32

1 はじめに

近年、ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) や CATV (Community Antenna Television)、FTTH (Fiber To The Home) などの高速な通信環境が手軽に利用できるようになったことで、インターネットの利用者が爆発的に増加してきた。それにともない、現在広くインターネットで利用されている IPv4 (Internet Protocol version 4) ではアドレス空間の枯渇が深刻な問題となっている。これは IPv4 におけるアドレスが 32 ビットで表現され、最大でも 43 億個程度のアドレスしか利用できないためである。現在インターネットは WWW (World Wide Web) や E-mail で多く用いられているが、今後は携帯端末や家電製品による利用も見込まれており、近い将来 IP アドレスが枯渇すると容易に想像できる。

このため IETF (The Internet Engine Task Force) を中心として次世代 IP プロトコルである IPv6 (Internet Protocol version 6) [1] が標準化された。IPv6 ではアドレスが 128 ビットに拡大され、膨大な数の IP アドレスを利用可能である。また IPv6 は IPv4 におけるアドレス枯渇問題を解消するだけでなく、さらにインターネットの普及にともなって生じた要求にも対応するため、セキュリティや移動端末、リアルタイム通信のサポートなど、新たな機能が導入されている。現在、IPv6 はすでに一部で実用化が始まっており、IPsec やモバイル IP などいくつかの IPv6 の新機能はすでに実装が行なわれている。

このような IPv6 における新たな機能の一つとしてエニーキャストアドレスがある。エニーキャストアドレスは同一の機能 (サービス) を提供する複数のサーバに割り当てることが可能で、クライアントはエニーキャストアドレスを指定するだけで最適なサーバと通信することが可能になる。例えば、既知のエニーキャストアドレスをインターネット上の全ての DNS サーバに割り当てることで、あらかじめ OS 上で DNS サーバのアドレスを設定することができるため、従来のようにクライアント側で DNS サーバのアドレスを手動で設定する必要はなくなる。さらに、今まで利用

していた DNS サーバが停止したとしても、ルータが他の DNS サーバへの経路を探索し新たに利用可能な DNS サーバを発見するだけで、クライアントは最初に利用していた DNS サーバが停止したことを意識することなく、継続して DNS サービスを利用することが可能となる。

このようにエニーキャストアドレスは、その利用が非常に期待されている技術であるが、現状ではほとんど利用されていない。この原因として、エニーキャスト通信に必要となる多くの機能がいまだ定義されていないことがあげられる。特に、エニーキャストアドレスを扱うことのできるルーティングプロトコルが明確に規定されていないため、ネットワーク上の任意の場所にエニーキャストアドレスを割り当てられたサーバが存在する場合にエニーキャスト通信が利用できない、といった問題点がある。

文献 [2] ではこの問題を解決するため、グループ管理方式およびルーティングテーブル作成手法といったマルチキャスト通信とエニーキャスト通信との類似性を元に、エニーキャストルーティングプロトコル PIA-SM (Protocol Independent Anycast - Sparse Mode) を提案している。しかしながら文献 [2] では、プロトコルの動作は示しているものの、実装実験などでその動作を確認していない。また、実装を行って初めて表面化する仕様上の問題点も存在すると考えられる。

そこで本報告では、文献 [2] における提案方式 PIA-SM の実装を通して仕様の曖昧な点について検討し、実証実験を行うことにより PIA-SM の実現可能性を検討する。

本報告の構成は以下の通りである。2 章ではまず、PIA-SM の設計の元となっている PIM-SM (Protocol Independent Multicast - Sparse Mode) [3] および PIA-SM の概要を示す。さらに、PIA-SM の実装に必要な詳細な仕様について述べる。次に 3 章では、PIA-SM を実装する際に明らかになった問題点とそれに対する解決策について述べ、実機実験による動作確認を通して PIA-SM の実現可能性を示す。最後に 4 章でまとめと今後の課題について述べる。

2 エニーキャストルーティングプロトコル PIA-SM

本報告ではマルチキャストルーティングプロトコルを元にしたエニーキャストルーティングプロトコルの設計と実装について述べる。そこで、この章ではまず、マルチキャストルーティングプロトコル PIM-SM について概要を示し、次に、それを元にエニーキャストルーティングプロトコル PIA-SM の設計について述べる。

2.1 PIM-SM プロトコルの概要

マルチキャスト通信では、送信者ノードから送出されたあるマルチキャストアドレス宛のパケット(マルチキャストパケット)は、そのマルチキャストアドレスを割り当てられている全ての受信ノード(マルチキャストリスナー)に配送される。このとき、送信ノードからマルチキャストリスナーへの経路上に存在するルータが、異なるインターフェース上に存在するマルチキャストリスナーに対して、パケットを複製して配送する。このように、送信元から送出された単一のパケットを経路上のルータが適宜複製し、最終的に全てのマルチキャストリスナーに配送する手法がマルチキャストルーティングプロトコルである。

マルチキャストルーティングプロトコルには、その適用範囲と伝搬性能に応じて3種類のプロトコルが定義されている [3-5]。本研究ではそのひとつである PIM-SM に着目する。PIM-SM では各マルチキャストアドレスごとに、1台の特別なルータ(ランデブーポイント)を準備し、そのルータを根とした共通の配送木(共有ツリー)を作成する。マルチキャストパケットはこの共有ツリーにしたがって配送される。このとき、経路上の各ルータ(PIM ルータ)において、複数の出力インターフェースの方向にマルチキャストリスナーが存在する場合、パケットが複製される。PIM-SM の処理手順は以下の通り(図1)である。

1. 隣接 PIM ルータの発見

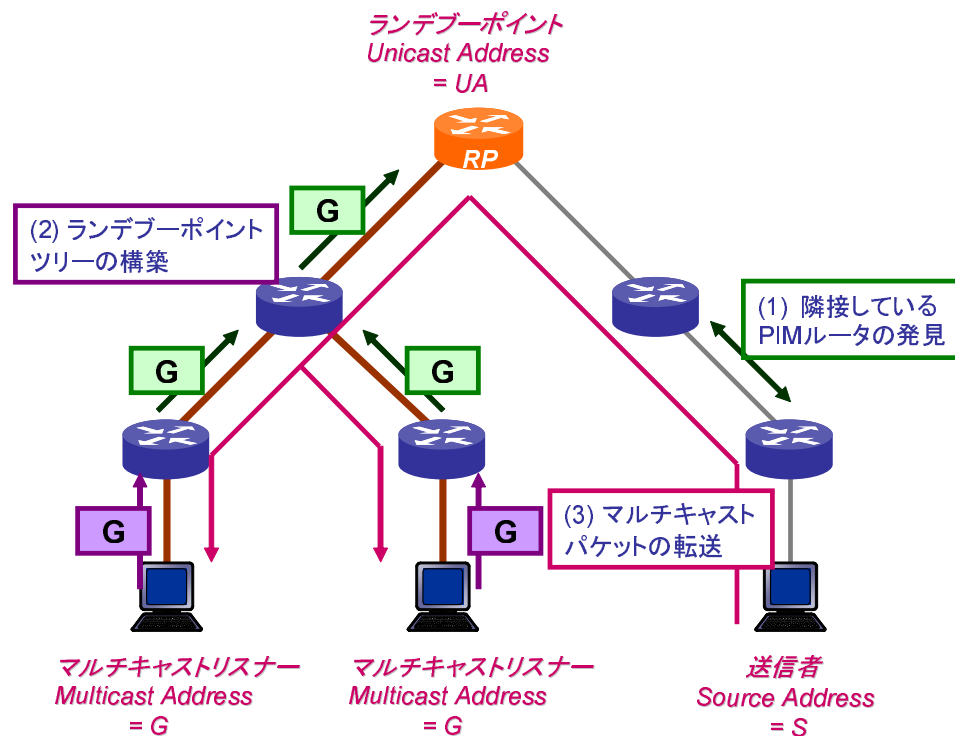


図 1: PIM-SM の概要

各 PIM ルータは、メッセージを交換することで直接接続している PIM ルータを発見する。

2. ランデブーポイントツリーの構築

マルチキャストリスナーは参加するグループを隣接する PIM ルータに通知する。マルチキャストリスナーの存在を検知した PIM ルータは、ランデブーポイントへそのマルチキャストアドレスを通知する。その結果、図 1 で示すようなランデブーポイントを根とし、マルチキャストリスナーを葉とした共有ツリーが作成される。この共有ツリーをランデブーポイントツリーと呼ぶ。

3. ランデブーポイントツリーによるマルチキャストパケットの転送

マルチキャストアドレス宛にパケットが送出されると、送信者に直接接続した PIM ルータが、受信したマルチキャストパケットにランデブーポイントのユニキャストアドレスを付加し (カプセル化) ランデブーポイントに送信する。ランデブーポイントはこのカプセル化されたパケットを受信すると、まず元のマルチキャストパケットを取り出し、その後ランデブーポイントツリーに沿って、全てのマルチキャストグループリスナーにパケットを転送する。

この手順について、以下の節で順に説明する。

2.1.1 隣接 PIM ルータの発見

直接接続している PIM ルータの発見の手順は以下の通りである (図 2)。

1. PIM Hello メッセージの送信

PIM ルータは、直接接続している PIM ルータを知るために、PIM Hello メッセージを交換する。それぞれの PIM ルータによってセグメント上に送信された PIM Hello メッセージは、セグメント上の全ての PIM ルータが受信する。

2. 指名ルータの選択

各セグメント上で Hello メッセージを送信した PIM ルータの中の 1 つが、セグメント上の指名ルータとして選択される。

隣接している PIM ルータの発見により、PIM ルータ間のネットワークを構築する。

2.1.2 ランデブーポイントツリーの構築

ランデブーポイントツリーを構築する手順は以下の通りである (図 3)。

1. MLD Report の送信

マルチキャストリスナーはマルチキャストグループに参加する場合、参加する

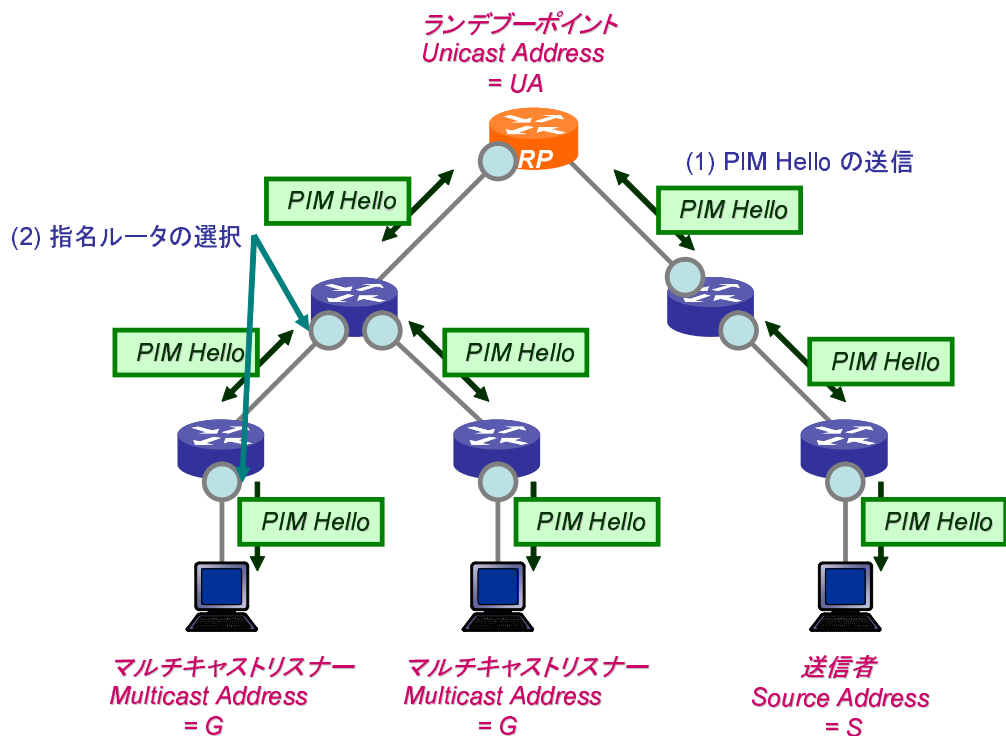


図 2: 隣接 PIM ルータの発見

マルチキャストアドレス G を含めた MLD Report というメッセージを直接接続する PIM ルータに送信することで、自身に割り当てられているマルチキャストアドレスを直接接続している PIM ルータに通知する。MLD Report は ICMPv6 MLD (Multicast Listener Discovery) [6] で用いられるメッセージのうちの 1 つである。

2. PIM Join メッセージの送信

マルチキャストリスナーの存在を知った PIM ルータは、MLD Report に書かれたマルチキャストアドレス G を含んだ PIM Join というメッセージを、対応するランデブーポイントのユニキャストアドレスへ送信する。これを同じマルチキャストアドレスを割り当てられたマルチキャストリスナーそれぞれが行なう

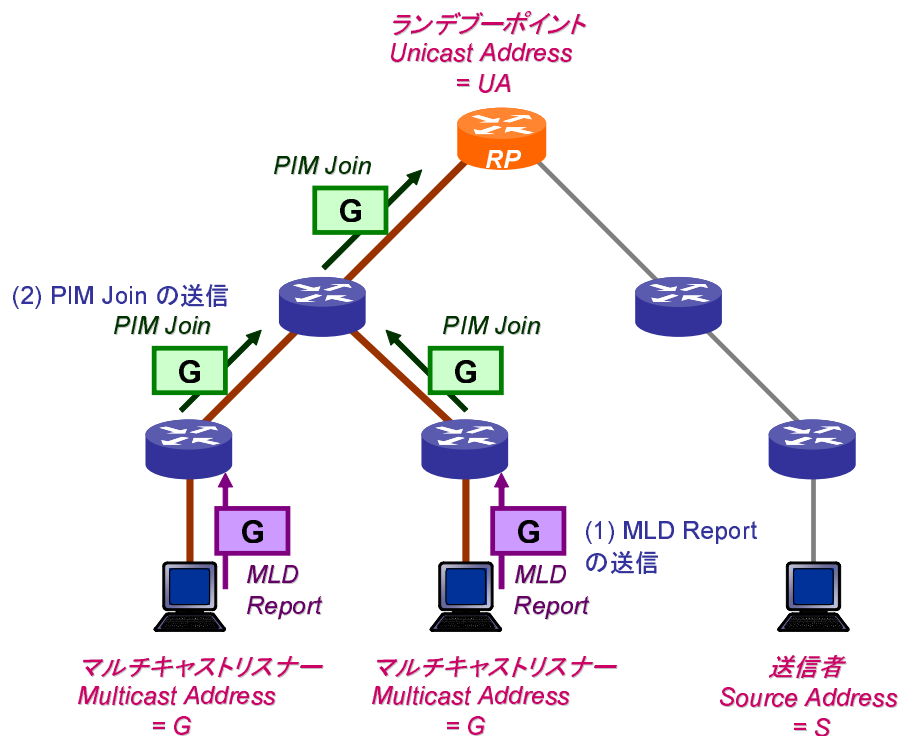


図 3: ランデブーポイントツリーの構築

ことにより、マルチキャストリスナーからランデブーポイントへの共有ツリー (ランデブーポイントツリー) が作成される。

2.1.3 マルチキャストパケットの転送

マルチキャストパケットが転送される手順は以下の通りである (図 4)。

1. 送信者からのマルチキャストパケットの送信
送信者はマルチキャストアドレス G 宛にパケットを送信する。
2. カプセル化とランデブーポイントへのマルチキャストパケットの転送
送信者に直接接続する PIM ルータは、送信されたマルチキャストパケットの

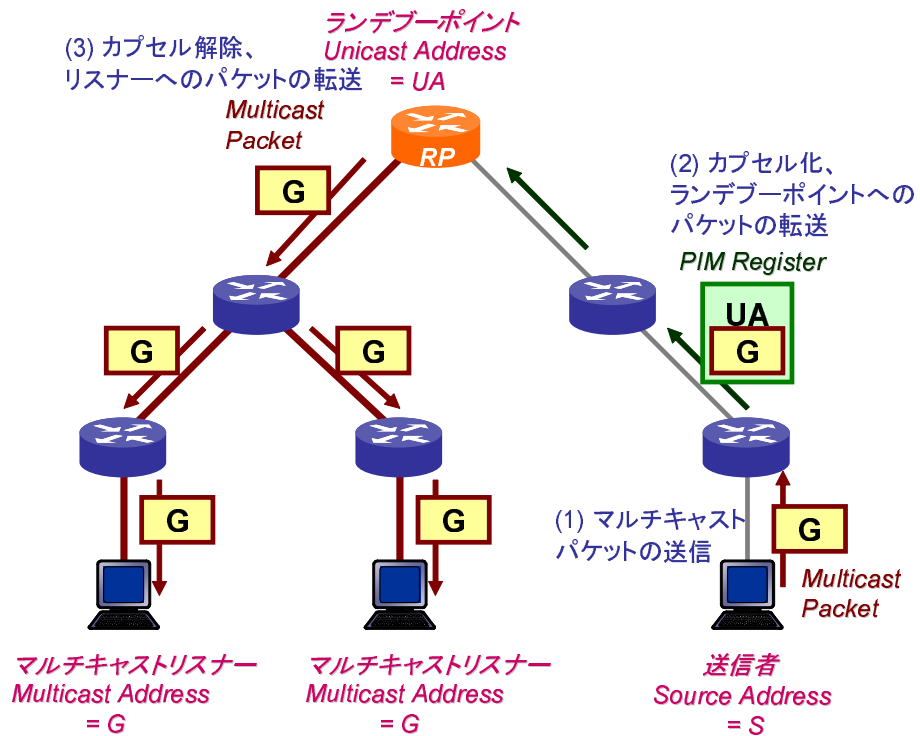


図 4: マルチキャストパケットの転送

宛先アドレスに対応したランデブーポイントのユニキャストアドレスでカプセル化し、ランデブーポイントへと送信する。このカプセル化されたメッセージを PIM Register と呼ぶ。

3. カプセル化解除とマルチキャストリスナーへのパケットの転送

PIM Register メッセージを受信したランデブーポイントは、カプセル化を解除してマルチキャストパケットを取り出し、ランデブーポイントツリーに沿ってマルチキャストパケットを転送する。経路の途中のルータにおいて、異なるインターフェースにマルチキャストリスナーが存在する場合は、パケットを複製して配送する。

このように、PIM-SMによるマルチキャストルーティングでは、ランデブーポイントツリーに沿ってマルチキャストパケットが送信者から全てのマルチキャストリスナーに転送される。しかし、ランデブーポイントツリーによるパケットの転送には以下のような問題点が残されている。

- ランデブーポイントにおいてトラフィックが集中する
- 送信者とマルチキャストリスナーの間が最短経路ではない

この問題点を解消するため、同じ送信元からのパケットの配送がランデブーポイントにおいて設定された転送量を超えて行なわれる場合、ランデブーポイントツリーから、送信者に隣接するルータを根とする送信元ツリーへとパケットの転送経路を移行することができる。

以上がマルチキャストルーティングプロトコルPIM-SMの概要である。

2.2 PIA-SM プロトコルの概要

エニーキャスト通信では、マルチキャスト通信と異なり、あるエニーキャストアドレス宛に送信されたパケット(エニーキャストパケット)は、同一のエニーキャストアドレスを割り当てられてた複数のノード(エニーキャストレシーバ)の中の最適な1台のみに配送される。

マルチキャスト通信、エニーキャスト通信およびユニキャスト通信を比較する(表1参照)。この比較からエニーキャストルーティングを実現するには、以下のような方針で設計すればよいと考えられる。

1. グループ管理をマルチキャストルーティングと同様に行なう
2. パケットの転送をユニキャストルーティングと同様に行なう

表 1: エニーキャスト通信と他の通信の性質の比較

	通信対象	通信形態	アドレス空間
ユニキャスト	1	1 対 1	マルチキャストのアドレス以外
マルチキャスト	多数	1 対 多数	専用のアドレス
エニーキャスト	多数	1 対 1	ユニキャストと共用

マルチキャストとエニーキャストは、ともに受信するホストが複数存在するので、エニーキャストルーティングを考える場合には、マルチキャストルーティングで行なわれるグループ管理方法が利用可能である。しかし、マルチキャストでは同じアドレスを割り当てられた全てのホストが受信するのに対し、エニーキャストでは同じアドレスを割り当てられた全てのホストの中の最適な 1 台のみが受信する。よってパケットの配送方式がマルチキャストとエニーキャストで大きく異なる。

そこで表 1 の比較より、ユニキャスト通信は 1 台のホストがパケットを受信することに着目すると、エニーキャストアドレスはユニキャストアドレスと共用であるので、エニーキャストアドレス宛のパケットの転送には、ユニキャストルーティングを用いればよいと考えられる。

つまり、ユニキャストおよびマルチキャストの性質を考えると、グループの概念はマルチキャストとエニーキャストが類似しており、パケットの転送においてはユニキャストとエニーキャストが類似しているといえる。そこで文献 [2] で提案されているように、グループ管理には PIM-SM で用いられるランデブーポイントツリーを採用し、ランデブーポイントツリーの情報に基づいて、ユニキャストルーティングテーブルにエントリを作成するという設計で PIA-SM を実装することにする。

この時、エニーキャスト通信において最適な 1 台を選択する必要がある。ランデブーポイントツリーによるグループ管理を行なう場合、最適な 1 台を選択するには、根(ランデブーポイント)から順に末端まで比較しなければ、全てのエニーキャストレシーバを比較することはできないと考えられる。そこでエニーキャストパケット

はランデブーポイントからランデブーポイントツリーに沿って、各経路を比較しながらパケットを転送する。そうすることで、最適な1台のエニーキャストレシーバにパケットは到達すると考えられる。

よって、PIA-SM ではPIM-SM に以下のような変更を適用し、エニーキャストルーティングを実現する。

- ランデブーポイントはPIM Join と同様の手法で集めたエニーキャストレシーバの中から1台を選択し、自身のユニキャストルーティングテーブルに登録する。
- 各PIA ルータが、ランデブーポイントツリーを構成する経路の中から1つの経路を選択して、ユニキャストルーティングテーブルには、この経路をエニーキャストアドレスのエントリとして作成する。こうすることで、ランデブーポイントからエニーキャストレシーバまでの間では、宛先アドレスがエニーキャストアドレスのパケットもユニキャストパケットと同様にユニキャストルーティングで転送される。
- 送信されたエニーキャストアドレス宛のパケットは、ランデブーポイントまでカプセル化して転送され、ランデブーポイントからはユニキャストルーティングを用いて転送される。

よって、PIA-SM によるエニーキャストルーティングは以下の手順で実現される(図5)。

1. 直接接続しているPIA ルータの発見

各PIA ルータは隣接するPIA ルータを発見する。

2. ランデブーポイントツリーの構築

エニーキャストレシーバは参加するグループを隣接するPIA ルータに通知す

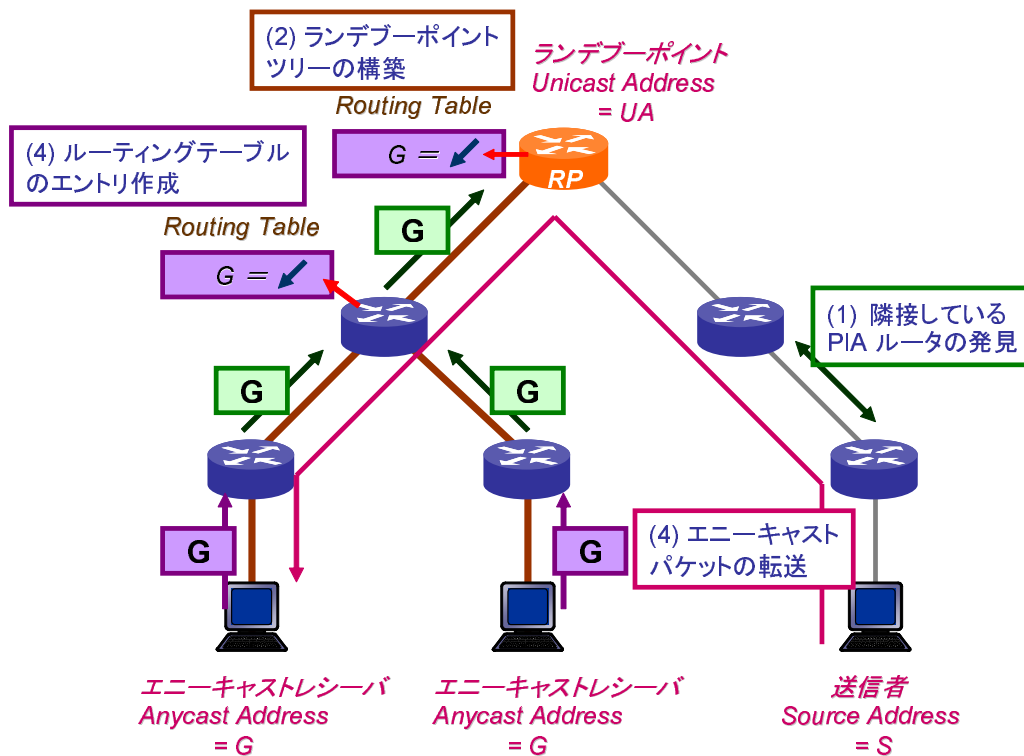


図 5: PIA-SM の概要

る。エニーキャストレシーバの存在を知った PIA ルータはランデブーポイントへ参加するグループを通知する。

3. ユニキャストルーティングテーブルへの登録

ランデブーポイントの構築したランデブーポイントによる配送経路は複数のエニーキャストレシーバへの経路である。その中から最適な 1 つの経路を選択してユニキャストルーティングテーブルにエニーキャストアドレスのエントリを作成する。

4. エニーキャストパケットの転送

送信者がエニーキャストアドレス宛に送信したパケットは、PIA ルータがカブ

セル化してランデブーポイントのユニキャストアドレス UA へ転送する。ランデブーポイントはカプセル化を解除してエニーキャストパケットを取り出し、ユニキャストルーティングに基づいてエニーキャストパケットを転送する。

この手順について、以下の節で説明する。

2.2.1 隣接 PIA ルータの発見

直接接続している PIA ルータの発見の手順は以下の通りである。PIA-SM において隣接する PIA ルータを発見する方法は PIM-SM と同様に、Hello メッセージ (PIA Hello) を用いて行なう。また、同様の手法で指名ルータを選択する。隣接 PIA ルータの発見により、PIA ルータ間のネットワークを構築する。

2.2.2 ランデブーポイントツリーの構築

ランデブーポイントツリーを構築する手順は以下の通りである (図 6)。

1. ARD Report の送信

エニーキャストレシーバはエニーキャストグループに参加する場合、参加するエニーキャストアドレス G を含めた ARD Report というメッセージを直接接続している PIA ルータに送信することで、自身に割り当てられているエニーキャストアドレスを直接接続している PIA ルータに通知する。ARD (Anycast Receiver Discovery) は ICMPv6 MLD をエニーキャストアドレスが扱えるように拡張したもので、文献 [7] で提案されている。ARD Report はこの ARD メッセージのうちの 1 つであり、エニーキャストレシーバが属するエニーキャストグループを PIA ルータに通知するメッセージである。

2. NDP キャッシュのエントリ作成

ARD Report を受信した PIA ルータは、同一セグメント上のエニーキャスト

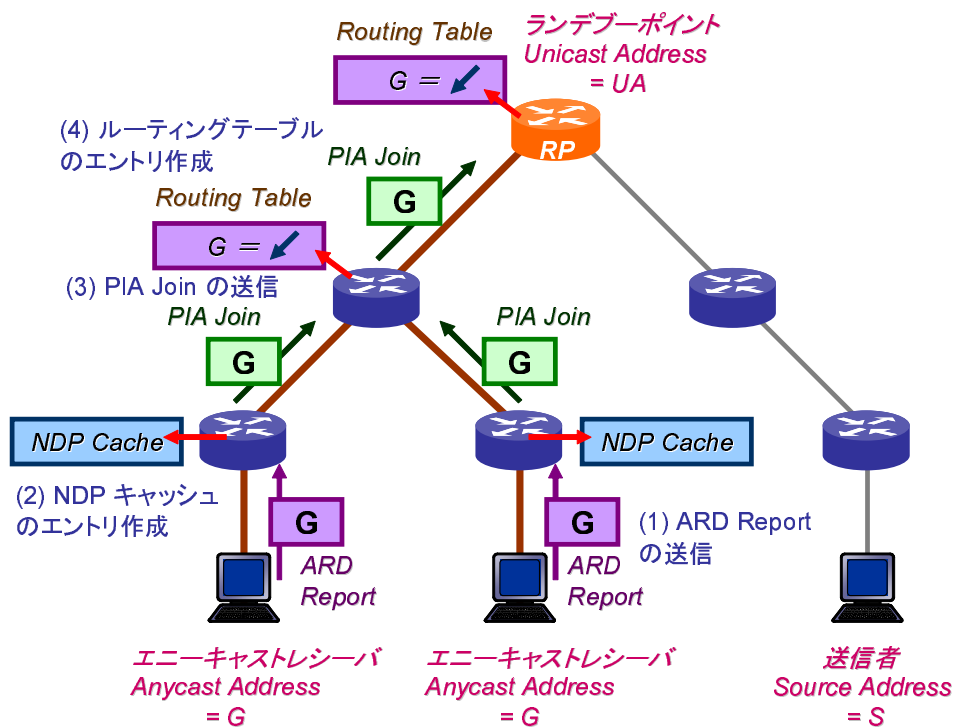


図 6: PIA ルータによるランデブーポイントツリーの構築

レシーバのエントリを NDP (Neighbor Discovery Protocol) キャッシュに作成する。NDP キャッシュとは IP アドレスとリンク層アドレスを対応づけるものである。この処理は PIM-SM の時にはなかった処理である。この処理を行なうのは、エニーキャストアドレスがユニキャストアドレスと共用であり、エニーキャストアドレス宛のパケットは、宛先アドレスをリンク層アドレスに解決できなければ、セグメント上でエニーキャストレシーバにパケットの転送が行えないためである。

3. PIA Join の送信

エニーキャストレシーバの存在を知った PIA ルータは、ARD Report に書かれたエニーキャストアドレス G を含んだ PIA Join というメッセージを、対応す

るランデブーポイントのユニキャストアドレスへ送信する。これを同じエニーキャストアドレスを割り当てられたエニーキャストレシーバそれぞれが行なうことにより、エニーキャストレシーバからランデブーポイントへのランデブーポイントツリーが作成される。

4. ユニキャストルーティングテーブルのエントリの作成

各PIA ルータは、ランデブーポイントツリーを構築する経路のうちの1つを選択して、ユニキャストルーティングテーブルにその経路をエニーキャストアドレスのエントリとして作成する。

この手順4において、本報告のPIA-SMでは、最初に受信したPIA Join またはARD Report の送信元への経路を選択する。これは最適なエニーキャストレシーバを選択したとは言えないが、最適なエニーキャストレシーバ選択のアルゴリズムの導入については今後の課題としている。

2.2.3 エニーキャストパケットの転送

エニーキャストパケットが転送される手順は以下の通りである(図7)。

1. 送信者からのエニーキャストパケットの送信

送信者はエニーキャストアドレスG宛にパケットを送信する。

2. カプセル化とランデブーポイントへのエニーキャストパケットの転送

送信者に直接接続するPIA ルータは、送信されたエニーキャストパケットの宛先アドレスに対応したランデブーポイントのユニキャストアドレスでカプセル化し、ランデブーポイントへと送信する。このカプセル化されたメッセージをPIA Capsule と呼ぶ。

3. カプセル化解除とエニーキャストレシーバへのパケットの転送

PIA Capsule メッセージを受信したランデブーポイントは、まず、カプセル化

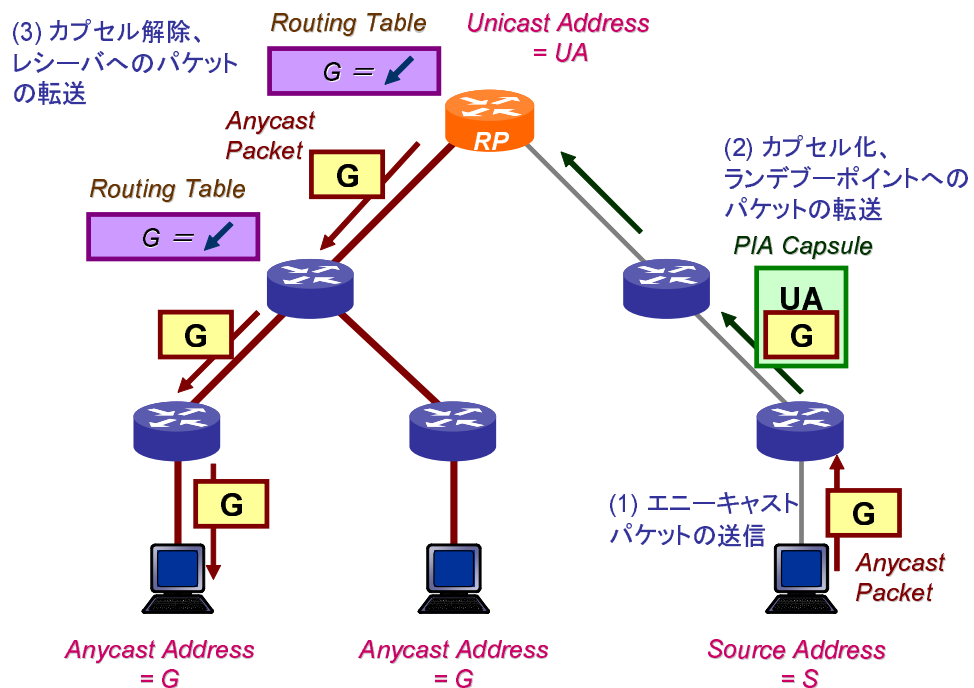


図 7: エニーキャストパケットの転送

を解除してエニーキャストパケットを取り出す。次に、そのパケットの宛先になるエニーキャストアドレスのエントリをユニキャストルーティングテーブルから検索し、転送する経路を決定して転送する。その後は、ユニキャストパケットと同様にランデブーポイントからエニーキャストレシーバまで転送される。

PIM-SM では、同じ送信元からのパケットの転送量が、ランデブーポイントで設定された転送量を超えると、送信元ツリーへの転送経路の移行が行なわれるが、PIA-SM では送信元ツリーへの転送経路の移行は考えない。これには以下の理由がある。

1. エニーキャスト通信においては送信元アドレスとしてエニーキャストアドレスを用いてはならないと IPv6 の仕様で定められている。このため最初に送信し

たパケットの宛先アドレスと返信のパケットの送信元アドレスは一致しなくなるので、TCP の 3 ウェイハンドシェイクのように、最初のパケットの宛先アドレスと返信のパケットの送信元アドレスが同じであることを想定している場合、エニーキャストアドレスを用いることができない。

2. よって、エニーキャストレシーバと連続した通信を行なう場合は、何らかのアドレス解決プロトコルによってエニーキャストアドレスをユニキャストアドレスに対応づけ、解決したユニキャストアドレスに対して行なうのが現実的である。そのため、送信元ツリーを用いてエニーキャストパケットの経路を最適化しても、ユニキャストによる通信では経路が違う可能性がある。

以上の理由から、PIM-SM で行なうような送信元ツリーへの転送経路の移行は PIA-SM では行なわず、ランデブーポイントと PIA Capsule によるエニーキャストパケットの転送のみを考えることにする。

以上がエニーキャストルーティングプロトコル PIA-SM の概要である。

2.3 PIA-SM プロトコルの詳細設計

この節では、前節で述べた PIA-SM の動作を実現するため、PIA-SM プロトコルの詳細を設計する。

2.3.1 指名ルータの決定

1 つのセグメント上において複数のルータが ARD メッセージを送信すると、セグメント上を流れる ARD メッセージの量が増え、帯域を無駄に消費してしまうため、1 つのセグメントごとに 1 台の ARD メッセージの送受信を管理するルータ (指名ルータ) を選択する。各セグメント上には、そのセグメントの指名ルータが定期的に ARD メッセージを送信する。同一セグメント上にある他の PIA ルータは、その

セグメント上で ARD メッセージの送信を行わない。そこでエニーキャストレシーバを探索する前に、セグメント上で1台の指名ルータを決定する必要がある。これは PIA Hello メッセージによって行われる。PIA Hello メッセージを定期的にセグメント上に送信することで、各 PIA ルータは直接接続する PIA ルータの存在を知り、同時に各セグメント上の指名ルータを決定する。

PIA Hello メッセージのフォーマットは図 8 で示される。以下、各フィールドの値について述べる。

- PIA Ver

PIA-SM プロトコルのバージョン番号。0 をセットする。

- タイプ

Hello メッセージでは 0 をセットする。

- 予約済み

送信者は 0 で初期化し、受信者はこのフィールドを無視する。

- チェックサム

IP プロトコル標準のものと同一アルゴリズムのチェックサム。

- オプションタイプ、オプション長、オプション値

それぞれオプションの種類、オプション値フィールドの長さ、オプション値を表す。オプションの種類は以下のものがある。

- 1 = ホールド時間

このメッセージを受信した PIM ルータは、オプション値で指定された秒数だけ、メッセージ送信元の PIA ルータへの経路を保持する。

- 19 = 指名ルータ優先度

オプション値に送信元の指名ルータの優先度を示す値がセットされる。

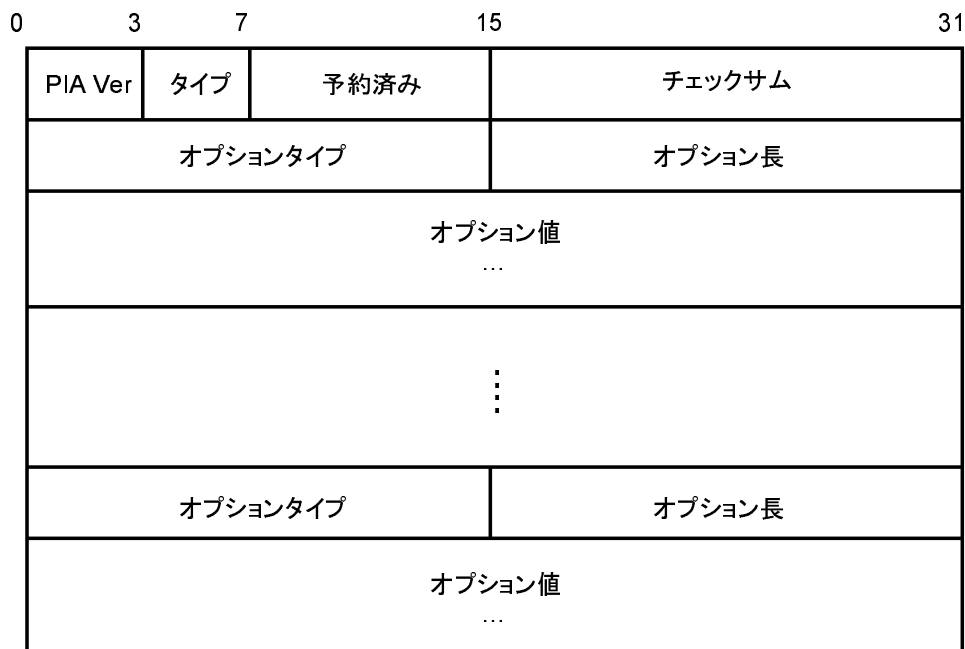


図 8: PIA Hello メッセージのフォーマット

- 20 = 生成 ID

PIA ルーティングを開始もしくは再開した時に、ランダムな値が設定される。

PIA Hello メッセージはリンク上の全ルータアドレス宛に送信される。指名ルータは各セグメント上で指名ルータ優先度の値が大きいアドレスを持つルータが選択される (図 9)。デフォルトでは、この優先度の値として Hello メッセージを送信したルータのユニキャストアドレスが用いられる。PIA ルータはエニーキャストルーティングを有効にしているインターフェイス上で、自身の指名ルータ優先度より大きい優先度を持つルータが送信した Hello メッセージを受信した場合、指名ルータにならない。Hello メッセージの受信の結果、自身の優先度が最も高い場合、その

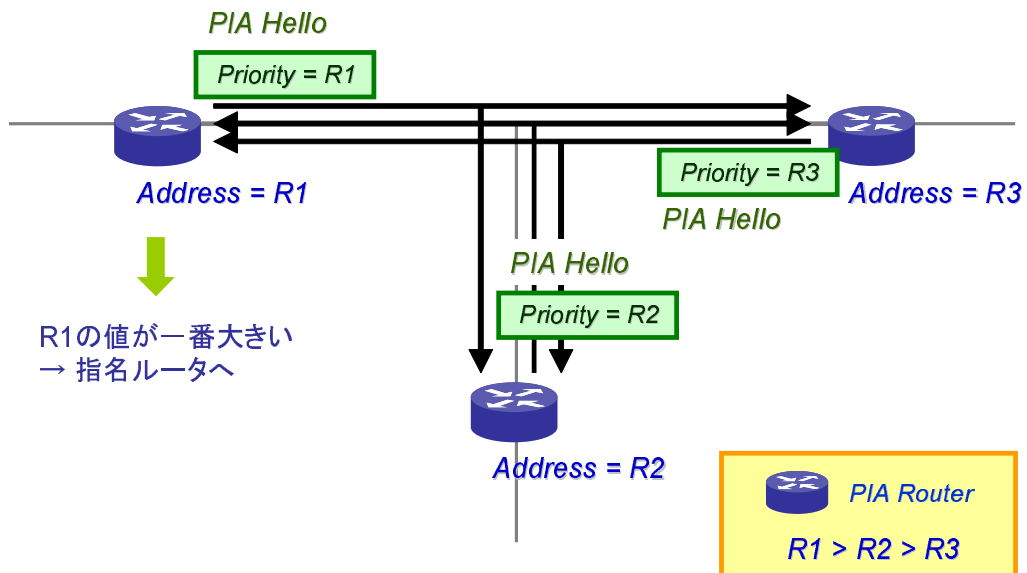


図 9: 指名ルータの選択

ルータは指名ルータとなり、そのインターフェイスが接続しているセグメント上の ARD メッセージの送受信を行なう。

2.3.2 エニーキャストレシーバの探索

エニーキャストレシーバの探索には 2.2 節で述べたとおり ICMPv6 MLD をエニーキャストアドレスが扱えるように拡張した ARD を用いる。ARD メッセージのプロトコルは文献 [7] の記述に従う。

ARD メッセージの目的はエニーキャストレシーバの存在を PIA ルータに通知することである。全ての ARD メッセージは送信元アドレスにリンクローカルのユニキャストアドレスをセットし、ホップリミットを 1 として送信される。ARD メッセージ

は Query、Report、Done の3種がある。それぞれのメッセージの役割は以下のようになる。

- ルータは ARD Query によってエニーキャストレシーバを探索する。ARD Query には2種類あり、全てのグループのエニーキャストレシーバを探索する ARD Query を General-Query、個別のグループのエニーキャストレシーバを探索する Query を Address-Specific Query と呼ぶ。
- ARD Query を受信すると、エニーキャストレシーバは参加しているエニーキャストグループのアドレスを ARD Report でルータに通知する。
- エニーキャストレシーバがエニーキャストグループから離脱する場合、エニーキャストレシーバは ARD Done メッセージでルータに離脱するグループを通知する。

以下 ARD のプロトコルについて、PIA ルータ側とエニーキャストレシーバ側に分けて説明する。

- PIA ルータ側の動作
 - ARD の General Query は宛先を同一セグメント上の全ホストとし、エニーキャストアドレスフィールドに 0 をセットして送信する。これは MLD の General Query と同じフォーマットである。このため、ルータにはマルチキャストの MLD Report メッセージとエニーキャストの ARD Report メッセージの両方が返ってくる可能性がある。返ってきた Report メッセージのうち、マルチキャストアドレスでないものを ARD Report メッセージとして受信する。
 - Address-Specific Query はエニーキャストアドレスフィールド、宛先アドレスの両方をエニーキャストグループのアドレスにして送信する。その

ため、この Query はルータが、そのエニーキャストグループの経路として選択している 1 つのエニーキャストレシーバにのみ受信される。

- ARD Done メッセージは MLD Done メッセージと同じ構造をしているので、メッセージのアドレスがマルチキャストアドレスでないものを ARD Done メッセージとして受信する。

- エニーキャストレシーバ側の動作

- 最初に、エニーキャストレシーバは参加したいエニーキャストグループの ARD Report メッセージを作成し送信する。Report メッセージは、エニーキャストアドレスフィールドに参加するグループのエニーキャストアドレスをセットし、Report メッセージの宛先アドレスにはセグメント上の全ルータを指定する。
- General-Query に対しては、エニーキャストレシーバが所属する全てのエニーキャストグループについて ARD Report メッセージを作成し、セグメント上の全ルータへ送信する。この時、ARD Query によって最大応答遅延時間が通知され、0 から最大応答遅延時間までの間のランダムな時間待ってから ARD Report をルータに送信する。同一セグメント上に同じエニーキャストアドレスを割り当てられているエニーキャストレシーバが複数存在する場合、それらすべてのエニーキャストレシーバが ARD Query に対して同時に ARD Report を送信すると、一時的にトラヒックが集中して発生する。これを防ぐため ARD Report の送信はランダムな時間待ってから行なわれる。
- Address-Specific Query に対しては、Query の宛先と同じグループの Report メッセージを作成し、セグメント上の全ルータへ送信する。
- ARD Done メッセージは、エニーキャストアドレスフィールドに離脱す

るグループのエニーキャストアドレスをセットし、宛先をセグメント上の全ルータにして送信する。

メッセージのフォーマットは Query、Report、Done の3種とも全て同じで、図 10 で示される。以下、各フィールドの値について述べる。

- タイプ

タイプは文献 [7] の記述通り、ICMPv6 プロトコルで規定されている MLD の番号を用いる。

- 130 = Query
- 131 = Report
- 132 = Done

- コード

0 がセットされる。

- チェックサム

ICMPv6 のチェックサムである。

- 最大応答遅延

General Query の場合にルータによって値がセットされる。エニーキャストレシーバは 0 から 最大応答遅延で指定されたミリ秒の間のランダムな時間待ってから Report メッセージを返す。

アドレス特定 Query の場合、このフィールドは 0 がセットされ、エニーキャストレシーバは Query を受信後、即座に Report メッセージを返す。

Report メッセージ、Done メッセージではこのフィールドは 0 がセットされる。

- 予約済み

送信者は 0 で初期化し、受信者はこのフィールドを無視する。

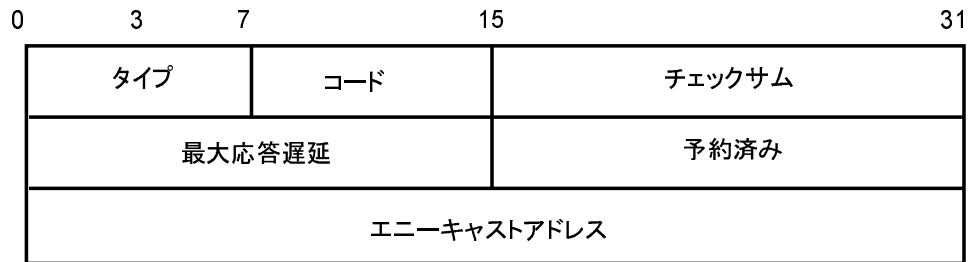


図 10: ARD メッセージのフォーマット

- エニーキャストアドレス

General Query の場合 0 がセットされる。その他のメッセージの場合、対象となるエニーキャストグループのアドレスがセットされる。

ARD Report メッセージを受信した PIA ルータは、Report メッセージが上流から来たかどうかを調べ、上流から来た Report メッセージだった場合はこれを無視する。ここで、上流とはランデブーポイント方向のことであり、上流であるかどうかは、ランデブーポイントのユニキャストアドレスとユニキャストルーティングテーブルにより決定される。上流から来た ARD Report メッセージでない場合は、IP アドレスからリンク層アドレスを参照するための NDP キャッシュに、以下の手順でエニーキャストアドレスのエントリを書き込む。

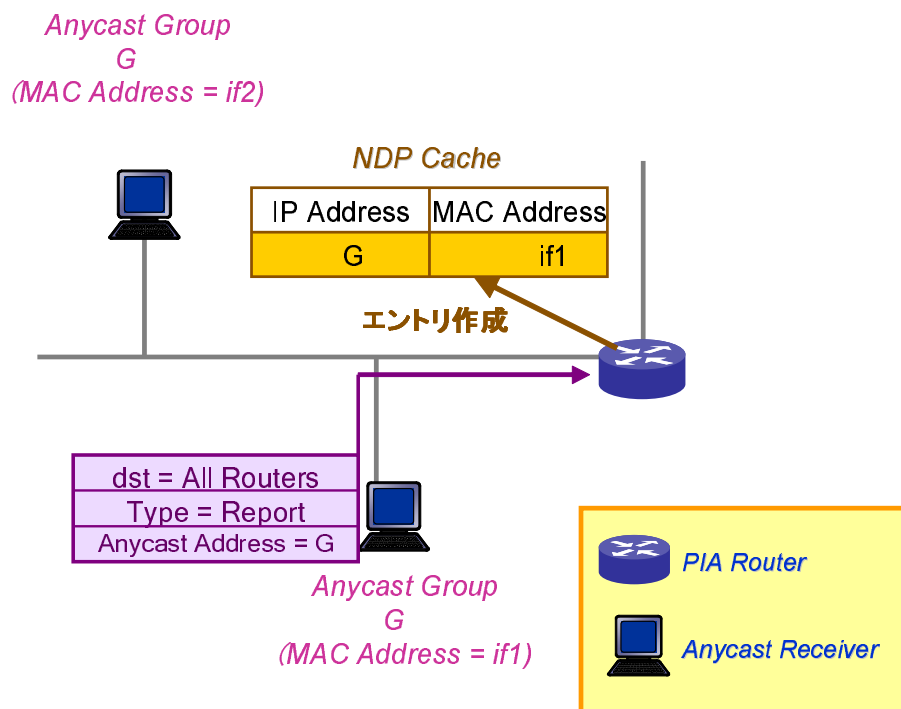


図 11: NDP キャッシュのエントリ作成

1. PIA ルータが ARP Report を受信した場合、ARP Report の送信元アドレスを対応するリンク層アドレスに、NDP プロトコル [8] を用いて解決する。この処理は 2 節でも述べた通り、エニーキャストアドレスがユニキャストアドレスと共用であり、エニーキャストアドレス宛のパケットは、宛先アドレスをリンク層アドレスに解決できなければ、セグメント上でエニーキャストレシーバにパケットの転送が行なえないためである。
 2. PIA ルータは NDP キャッシュからエニーキャストアドレスのエントリを検索し、NDP キャッシュにエニーキャストアドレスのエントリがなければ、エニーキャストアドレスと 1 で解決したリンク層アドレスの組のエントリを作成する。
- ただし、同じエニーキャストアドレスのエニーキャストレシーバがセグメント上に

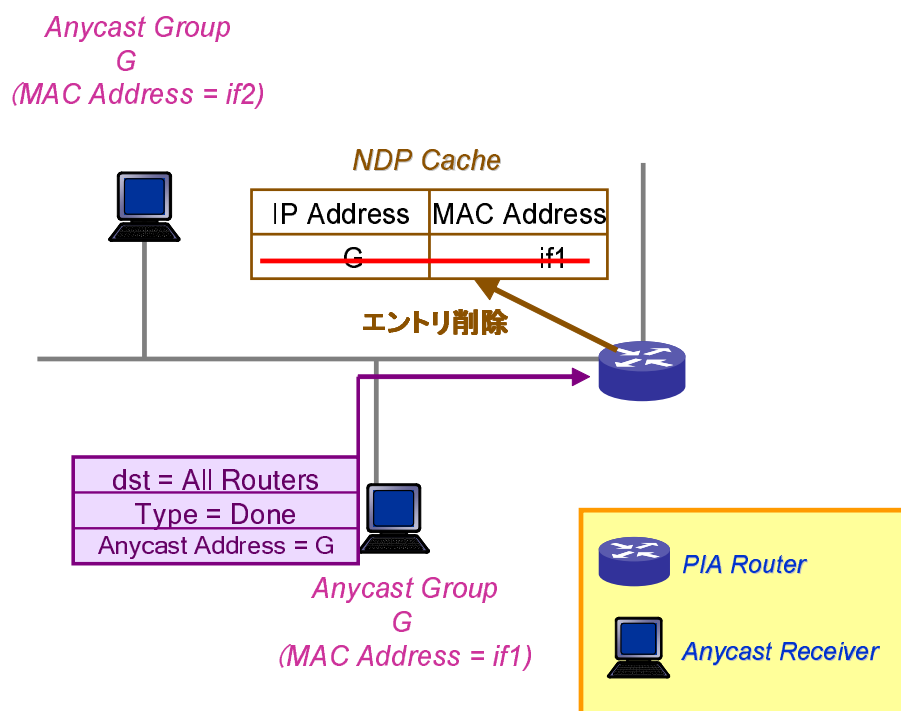


図 12: 同一セグメント上の経路選択

複数存在する場合は、既に NDP キャッシュにエニーキャストアドレスのエントリが存在する可能性がある。このとき、すでに NDP キャッシュにあるエントリは上書きしないものとする。これは 2.2.2 節で述べたように、本報告の PIA-SM では、最初に受信した PIA Join または ARD Report の送信元への経路を選択するとしたためである。

ARD Done メッセージを受信した PIA ルータは、ARD Report メッセージの時と同じように ARD Done メッセージが上流から来たかどうかを調べ、上流から来た ARD Done メッセージだった場合はこれを無視する。その後、ARD Done メッセージにより通知されたエニーキャストアドレスのエントリを NDP キャッシュから削除する (図 13)。

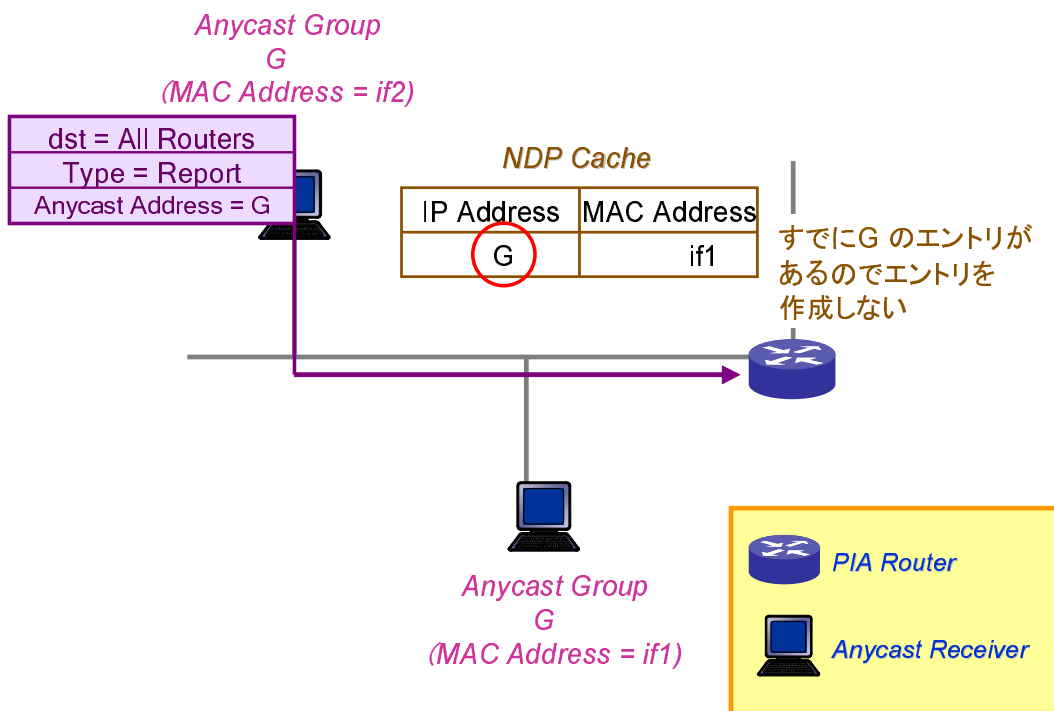


図 13: NDP キャッシュのエントリ削除

2.3.3 ルーティングテーブルへの登録

ランデブーポイントツリーの構築には PIA Join/Prune メッセージが用いられる。PIA Join/Prune メッセージは PIA ルータの状態を変化させる。PIA ルータの状態を変化させることで、PIA Join メッセージはランデブーポイントツリーに新たな経路を追加し、PIA Prune メッセージはランデブーポイントツリーの一部の経路を削除する。PIA Join/Prune メッセージによる PIA ルータの状態遷移は表 2 で表される。表 2 中の“枝”とは、ランデブーポイント方向以外の直接接続しているセグメントの中で、エニーキャストグループ G のメンバーが存在しているセグメントのことであり、ランデブーポイントツリーの枝にあたる。エニーキャストグループ G のメンバーは、グループ G のエニーキャストレシーバもしくはグループ G 参加状態の PIA

表 2: PIA ルータの状態遷移

グループ G	受信: Join メッセージ	受信: Prune メッセージ
初期状態	→ 参加状態	-
参加状態、枝 1 つ	-	→ 初期状態
参加状態、枝 2 つ以上	-	送信元により変化

ルータのいずれかであり、グループ G の Join メッセージを受信した PIA ルータは、グループ G 参加状態になる

PIA Join メッセージ受信時の処理の概要を図 14 で示す。PIA Join メッセージを受信したルータはランデブーポイントツリーを構築する。

以下、図 14 の内容について説明する。

1. エニーキャストレシーバの存在を知ったルータはグループ G 状態になり、上流のルータにグループ G の Join メッセージを送信する。
2. 初期状態の PIA ルータがグループ G の Join を受信した場合、その Join メッセージを受信したインターフェイスが上流のインターフェイスである場合は何もせず、そうでない場合は自身の PIA ルータの状態をグループ G 参加状態にする。
3. エニーキャストアドレス宛のパケットをこの Join メッセージを送信した PIA ルータへ転送するようにユニキャストルーティングテーブルに経路を作成する。
4. グループ G の Join メッセージをさらに上流の PIA ルータへ送信する。

ただし、複数のセグメントからグループ G の Join メッセージを受信する PIA ルータは、すでに同じエニーキャストアドレスのエントリがルーティングテーブルに存在する可能性がある。このとき、すでにルーティングテーブルにあるエントリは更新しないものとする。これは 2.2.2 節で述べたように、本報告の PIA-SM では、最初

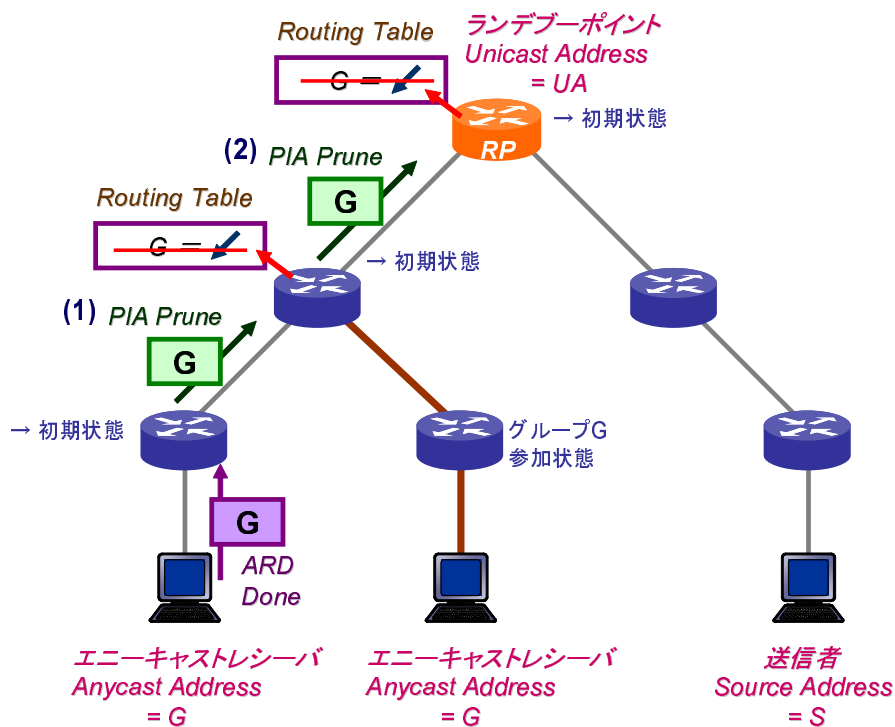


図 14: ユニキャストルーティングテーブルのエントリ作成

に受信した PIA Join または ARD Report の送信元への経路を選択しているためである。

PIA Prune メッセージ受信時の処理の概要を図 15 で示す。

1. エニーキャストレシーバがグループから離脱したことを知ったルータは初期状態になり、上流のルータにグループ G の Prune メッセージを送信する。
2. グループ G 参加状態を持っている PIA ルータがグループ G の Prune メッセージを受信した場合、まず Join メッセージのときと同様にランデブーポイントへの経路を探索する。その結果、グループ G の Prune メッセージを受信したインターフェイスが上流である場合何もしない。そうでない場合は、PIA Prune メッセージを受信したインターフェイス方向の経路をランデブーポイントツ

リーから切り離す。

3. さらに、グループ G の Prune メッセージを送信した PIA ルータが、エニーキャストアドレス G の経路としてユニキャストルーティングテーブルに登録されている場合はユニキャストルーティングテーブルからエニーキャストグループ G のエントリを削除し、自身の PIA ルータの状態を初期状態にして、グループ G の Prune メッセージを上流の PIA ルータへ送信する。そうでない場合は、グループ G 参加状態が維持される。

グループ G の Prune メッセージを受信したルータは、その Prune メッセージを受信した方向の経路をランデブーポイントから切り離す。さらに、その経路がユニキャストルーティングテーブルに登録した経路だった場合は、ユニキャストルーティングテーブルからもこの経路を削除する。

グループ G の Prune メッセージによりエニーキャストアドレスの経路がユニキャストルーティングテーブルから削除された後、次のグループ G の Join メッセージを受信すると、エニーキャストグループ G のアドレスの経路として、その Join メッセージの送信元の PIA ルータを指定し、このエントリをユニキャストルーティングテーブルに登録する (図 16)。

これにより、ランデブーポイントツリーにおけるエニーキャストレシーバへの経路と、ユニキャストルーティングテーブルにおけるエニーキャストアドレスへの経路が同期し、エニーキャストパケットをユニキャストルーティングを用いて転送することが可能となる。

PIA Join/Prune メッセージのフォーマットは図 17 で示される。以下、各フィールドの値について述べる。

- PIA Ver、タイプ、予約済み、チェックサム

PIA Hello メッセージの時と同様である。タイプには 3 がセットされる。

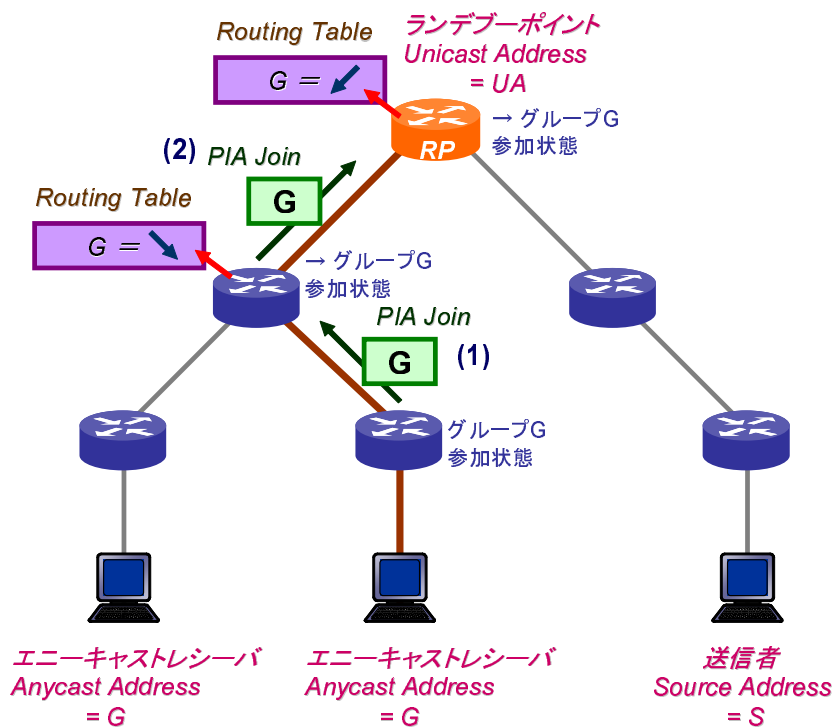


図 15: ユニキャストルーティングテーブルのエントリ削除

- 上流 PIA ルータのユニキャストアドレス
ランデブーポイントツリーの上流ルータのアドレスをセットする。
- 予約済み 2
送信者は 0 で初期化し、受信者は無視する。
- グループ数
Join/Prune メッセージに含まれるエニーキャストグループの数。
- ホールド時間
PIA Join/Prune メッセージを受信したルータは、ホールド時間で指定された秒数の間、Join/Prune の状態を保持しなければならない。つまり、グループ G の

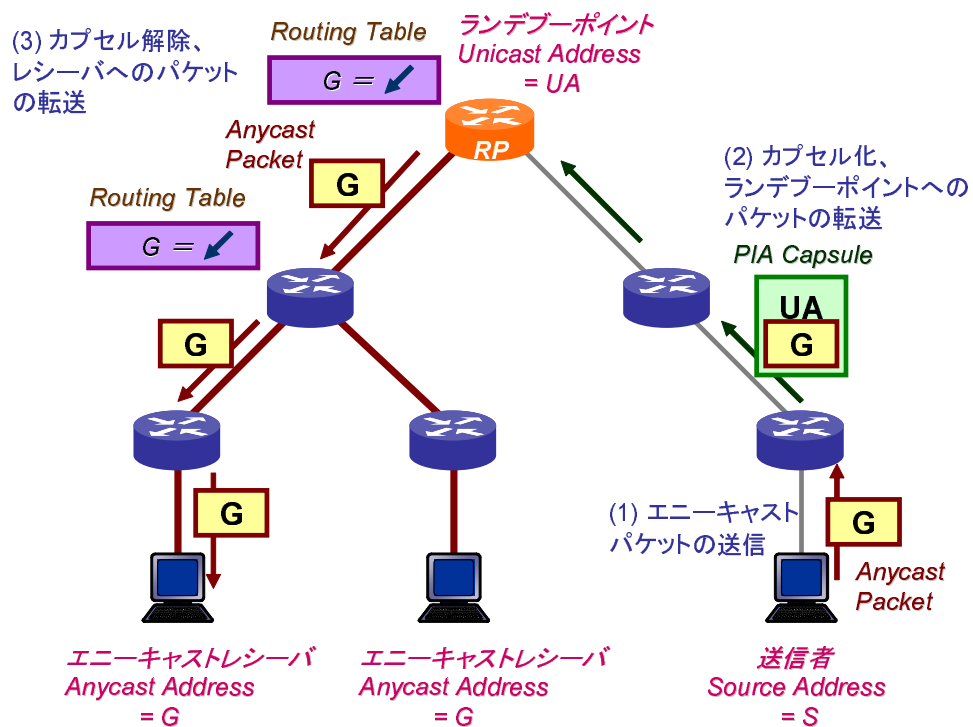


図 16: 他のエニーキャストレシーバへの経路変更

Join を受信した PIA ルータは、指定された時間の間グループ G の Prune メッセージを受信することなく、グループ G 参加状態から初期状態に戻ってはない。

- エニーキャストグループアドレス
エニーキャストグループのアドレスがセットされる。
- Join フラグ、Prune フラグ
エニーキャストグループに対して、Join メッセージの送信ならば Join フラグフィールドに 1 をセットし、Prune メッセージの送信ならば Prune フラグフィールドに 1 をセットする。

0	3	7	15	31
PIA Ver	タイプ	予約済み	チェックサム	
上流PIA ルータのユニキャストアドレス				
予約済み 2	グループ数		ホールド時間	
エニーキャストグループアドレス 1				
Join フラグ			Prune フラグ	
エニーキャストグループアドレス 2				
⋮				

図 17: PIA Join/Prune メッセージのフォーマット

2.3.4 パケットの転送

送信者がエニーキャストパケットを送信すると、送信されたエニーキャストパケットの宛先アドレスに対応したランデブーポイントのユニキャストアドレスでカプセル化し、ランデブーポイントへと送信する。このカプセル化されたメッセージを PIA Capsule と呼ぶ。ランデブーポイントにおいて PIA Capsule を受信すると、取り出したエニーキャストパケットの宛先グループに対応するランデブーポイントが自分であるかどうかを確認する。これを満たす場合、さらに自分がグループ G 状態であるかどうかを調べる。これはエニーキャストグループ G のエニーキャストレシーバが存在するかどうかを確認することに等しい。そのランデブーポイントの状態がグループ G 参加状態であれば、エニーキャストレシーバが存在し、ランデブーポイン

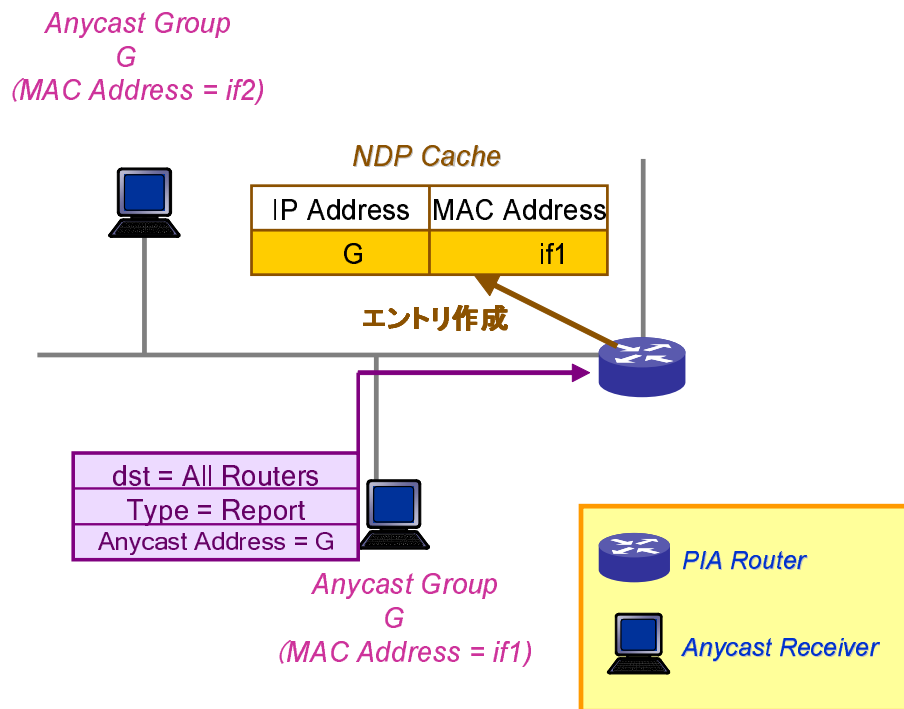


図 18: ユニキャストルーティングに基づくエニーキャストパケットの転送

トツリーが存在することを意味するので、そのツリーに従ってエニーキャストパケットを送出する (図 18)。転送されたエニーキャストパケットはエニーキャストレシーバまでユニキャストパケットと同様に転送される。これは前節で説明したように、PIA Join/Prune によってユニキャストルーティングテーブルにエニーキャストアドレスへの経路が作成されていることで実現される。

この PIA Capsule のフォーマットは図 19 で示される。以下、各フィールドの値について述べる。

- PIA Ver、タイプ、予約済み、チェックサム

PIA Hello と同様である。タイプには 1 がセットされる。

- 予約済み

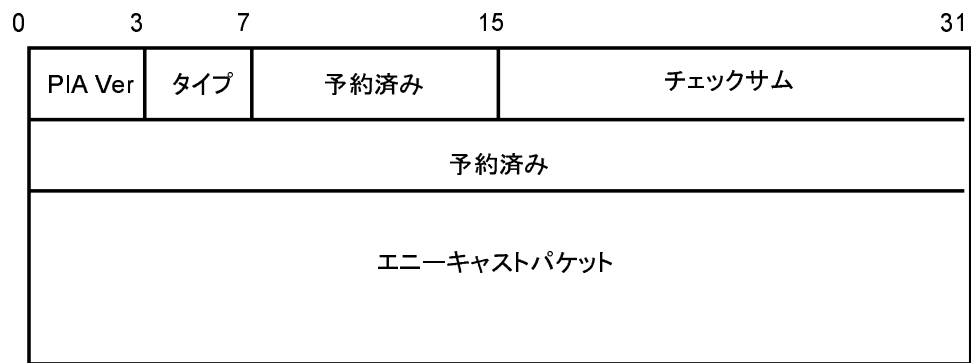


図 19: PIA Capsule メッセージのフォーマット

送信者は 0 で初期化し、受信者はこのフィールドを無視する。

- エニーキャストデータパケット

元のエニーキャストパケットのデータを IP ヘッダも含めてこのフィールドにセットする。

3 PIA-SM プロトコルの実装と動作確認

本章では、2章で述べた PIA-SM プロトコルを用いた PIA ルータを実機に実装して動作確認を行ない、PIA-SM プロトコルによってユニキャストパケットがユニキャストレシーバまで転送されることを示す。以下 3.1 節では PIA-SM プロトコルを FreeBSD 上に実装する方法について具体的に述べる。3.2 節では、実機を用いた動作確認の結果を示す。

3.1 FreeBSD 上での PIA-SM プロトコルの実装

FreeBSD において、ルーティングプロトコルはデーモンプログラムとして実装される。FreeBSD 上で動作する PIA-SM ルータのプログラムのことを以降の説明では PIA デーモンと呼ぶことにする。

FreeBSD では、カーネルが IP パケットを受信すると、パケットは IP 操作関数 `ip_intr()` に渡される。`ip_intr` は受信したパケットの IP プロトコルの種類と宛先アドレスから適切な関数を選択し、その関数に処理を渡す。

- もし受信したパケットの宛先アドレスがマルチキャストアドレスでないならばカーネルのユニキャスト転送関数 `ip6_forward()` に処理が渡される。この関数の中で、パケットの宛先アドレスのエントリをルーティングテーブルから検索し、エントリが見つかった場合はパケット出力関数 `ip6_output()` に処理が渡される。
- もし受信したパケットが PIA メッセージだった場合、PIA メッセージ操作関数 `pia6_input()` に処理が渡され、この関数が `rip6_input()` 関数を用いて PIA メッセージを PIA デーモンに渡す。
- もし受信したパケットが ICMPv6 パケットだった場合、ICMP メッセージ操作関数 `icmp6_input()` に処理が渡される。さらに ICMP メッセージが ARD

メッセージだった場合、この関数が `rip6_input()` 関数を用いて ARD メッセージを PIA デーモンに渡す。

全ての PIA メッセージと ARD メッセージは PIA デーモンに渡される。PIA デーモンはこれらのメッセージから PIA-SM のプロトコルにしたがってランデブーポイントツリーに関する情報を集める。これを PIA-SM ではランデブーポイントツリーインフォメーション (RPTI) と呼ぶ。PIA デーモンはこの RPTI を元にユニキャストルーティングテーブルを操作して、エニーキャストアドレスの経路を作成、更新、削除する。

エニーキャストルーティングプロトコルを実装する際の最も大きな問題点は、ユニキャストアドレスとエニーキャストアドレスを区別することができないという点である。これは [1] で定められた IPv6 の仕様である。このためカーネルが受信したパケットの宛先アドレスがエニーキャストアドレスかどうかで処理を分けるといったアルゴリズムは使うことができない。そこで、エニーキャストパケットもユニキャストパケットと同様の処理をカーネル内部で行ない、ユニキャストルーティングテーブルにエントリがあれば、その経路にしたがって転送されるようにする。これはエニーキャストアドレスのエントリが、ユニキャストルーティングテーブルにおいて、プレフィックス長 128 のアドレスとして登録されているため、最長一致検索によりパケットの宛先がエニーキャストアドレスに一致する場合は、かならずその経路が選択されるためである。

この処理の流れの概要を図 20 で示す。

PIA-SM デーモンの動作をまとめると次のようになる。

- ルーティングテーブルの作成、更新

1. カーネルは ARD メッセージを `icmp6_input()` に渡し、PIA メッセージを `pia6_input()` に渡すことで、これらのメッセージを全て PIA デーモンに渡す。

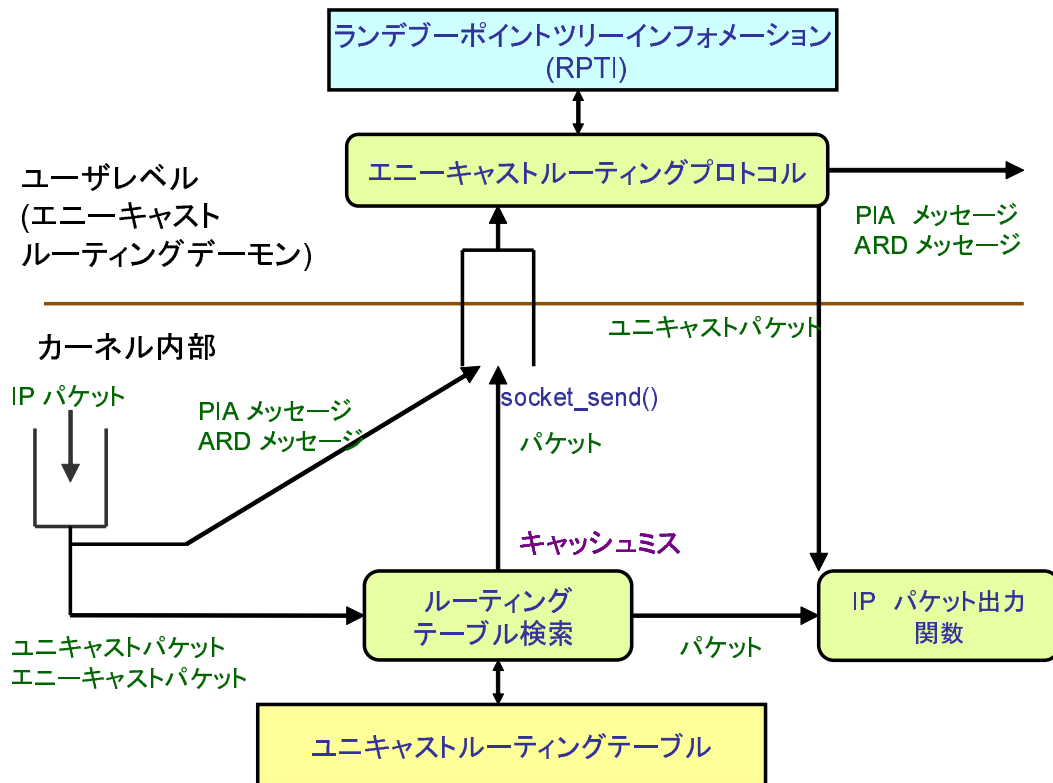


図 20: PIA-SM ルータ実装のモデル図

2. PIA デーモンはカーネルから受け取った ARD メッセージや PIA メッセージに基づいて、ランデブーポイントツリーインフォメーション (RPTI) に、ランデブーポイントツリーの経路情報を作成する。この RPTI にある経路から 1 つの経路を選択し、ユニキャストルーティングテーブルを更新する。

- パケット受信時の処理

1. カーネル内部ではエニーキャストアドレスとユニキャストアドレスを判別せず、ルーティングテーブルに宛先アドレスへの経路が存在したパケットは ip6_output () を通じて他のセグメントへ、ルーティングテーブル

に宛先アドレスへの経路が存在しなかったパケットは `rip6_input()` を通じて PIA デーモンへ転送される。

2. PIA デーモンはカーネルから受け取ったパケットの宛先がエニーキャストアドレスであるかどうかを、RPTI に登録されている、各ランデブーポイントが管理するグループのアドレスを検索することで判別する。
3. PIA デーモンが RPTI にこのパケットの宛先アドレスのエントリを持っており、対応するランデブーポイントのアドレスが RPTI から検索できた場合、このアドレスはエニーキャストアドレスであると判断してパケットを PIA Capsule にカプセル化して、そのランデブーポイントのユニキャストアドレスへ送信する。そうでない場合はパケットの宛先はユニキャストアドレスと判断して、パケットをデフォルトルータへ転送する。デフォルトルータが設定されていない場合はパケットは破棄される。

3.2 FreeBSD 上での PIA-SM プロトコルの動作確認

実装した PIA-SM デーモンを実際にルータ内部で動作させ、エニーキャストパケットの転送が行なわれる様子を示す。

パケットフォーマットの説明で PIA Ver フィールドの値に 0 をセットするとあるが、今回の実験ではこのフィールドに 2 をセットする。PIA メッセージのフォーマットは PIM メッセージと同じパケットフォーマットをしているため、こうすることで `tcpdump` で PIA メッセージの情報が PIM メッセージとして出力され、プロトコルの動作確認が簡単になる。

実験を行なったネットワークの構成は図 21 である。エニーキャストレシーバ 1、2 には同一のアドレス `1234::ffff` を割り当て、各エニーキャストレシーバー上で ARD デーモンを動作させる。エニーキャストレシーバはこのアドレスをパケットの送信元アドレスには用いない。これは現在の IPv6 の仕様でエニーキャストアドレス

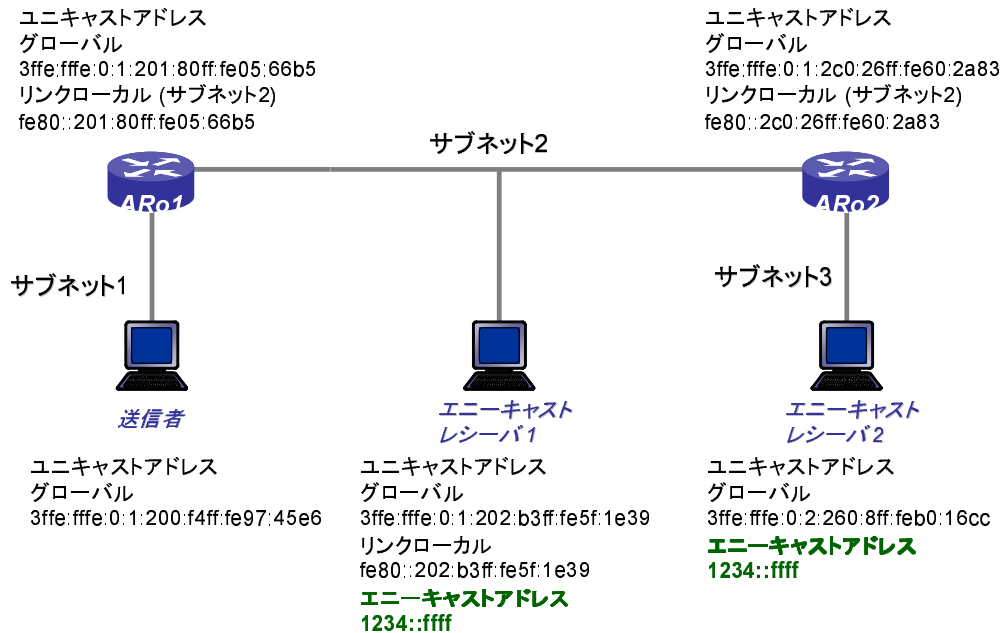


図 21: 実験環境

はパケットの送信元アドレスとして用いてはならないとあるためである [1]。そのため、エニーキャストレシーバはエニーキャストアドレス宛の ICMPv6 Echo Request を受信した場合、自身が持つユニキャストアドレスを送信元アドレスとした ICMPv6 Echo Reply を送信者に返す。よって、送信者がエニーキャストアドレス宛に Echo Request を送信し、選択されたエニーキャストレシーバのユニキャストアドレスを送信元アドレスとした Echo Reply が返ってくれば、エニーキャストルーティングが実現できていることが確かめられる。今回の実装ではエニーキャストレシーバの選択において、グループ G の ARD Report もしくはグループ G の PIA Join メッセージのうち、最も早く PIA ルータに到着したメッセージの送信元を、PIA ルータはそのグループ G の経路として選択する。

まず ARD メッセージの動作確認を行なう。このときの通信手順は以下の通りである。

1. PIA ルータデーモンは ARD Query をセグメント上に送信する。
2. エニーキャストレシーバ 1 が ARD Report メッセージを PIA ルータに送信する。
3. 送信者がエニーキャストアドレス 1234::ffff 宛に Echo Request を送信する。
4. エニーキャストレシーバ 1 のユニキャストアドレスから Echo Reply が返ってくる

この ARD メッセージの交換から Echo Reply が送信者に返ってくるまでの通信の記録を tcpdump による出力として図 22 に示す。この結果から ARD Report によって NDP キャッシュにエニーキャストアドレスのエントリが作成されたことが確認できた。

次に、2 台のルータの両方で PIA デーモンを起動し、エニーキャストパケットが PIA ルータによってエニーキャストレシーバまで転送されるかどうかの実験を図 21 のネットワークでおこなう。この通信手順は以下の通りである。

1. PIA ルータが送信する ARD Query を各サブネット上に送信する。
2. エニーキャストレシーバ 1、2 は ARD Report を PIA ルータに返す。
3. 送信者がエニーキャストアドレス 1234::ffff 宛に Echo Request を送信する。
4. PIA ルータ ARo1 がエニーキャストパケットを PIA Capsule にカプセル化しランデブーポイント ARo2 へ転送する。
5. ランデブーポイント ARo2 で PIA Capsule からエニーキャストパケットを取り出し、エニーキャストレシーバ 1 または 2 へ転送される。

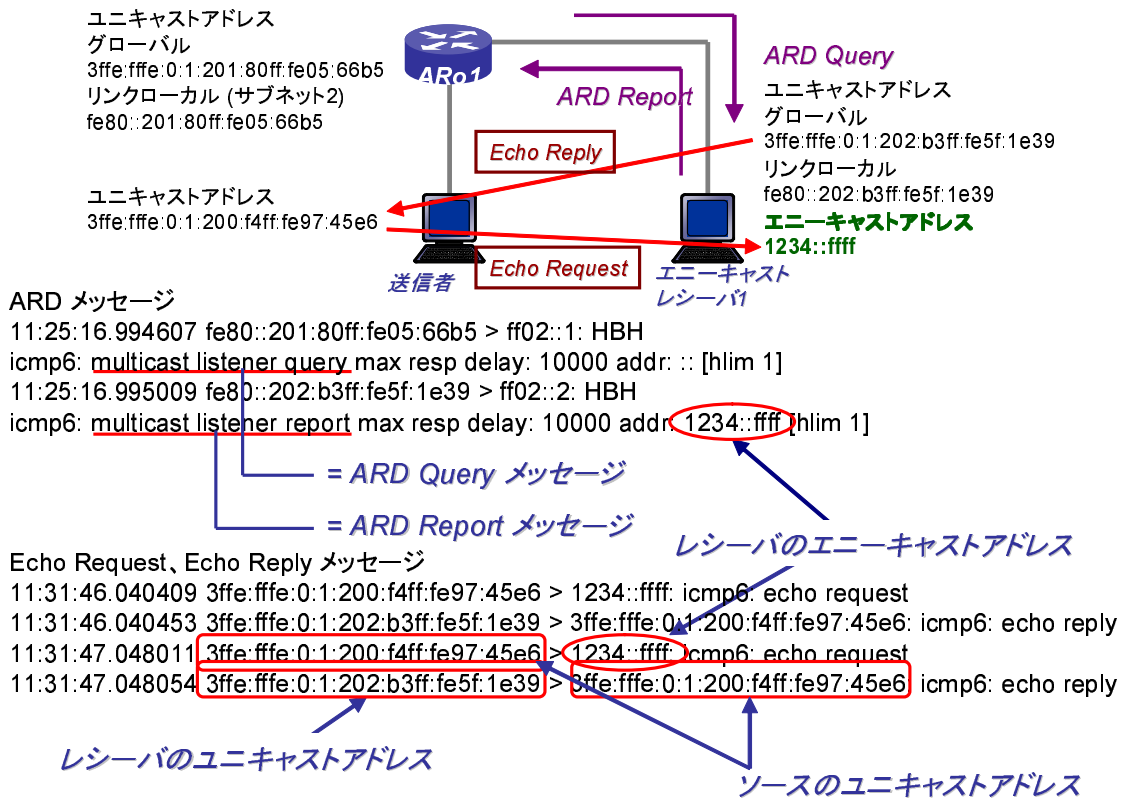


図 22: ARD メッセージによるセグメント上のエニーキャストパケットの転送結果

6. いずれかのエニーキャストレシーバのユニキャストアドレスから Echo Reply が返ってくる

この実験では、エニーキャストレシーバ 1、2 の両方が ARD Report メッセージを返すことにする。この場合、ARD Report メッセージを送信するタイミングで経路が変化する。実行時は、先にエニーキャストレシーバ 1 から ARD Report メッセージが送信されたため、ランデブーポイントである ARo2 にはエニーキャストレシーバ 1 への経路が登録されている。今回の実験の設定では、ARo1 はエニーキャストレシーバ 1 より下流のルータになるため、エニーキャストレシーバ 1 が送信した ARD Report メッセージを受信しても 1234::ffff への経路は作成していない。この時のパケットの送受信の記録を図 23 で示す。この結果から、エニーキャストパケットをランデ

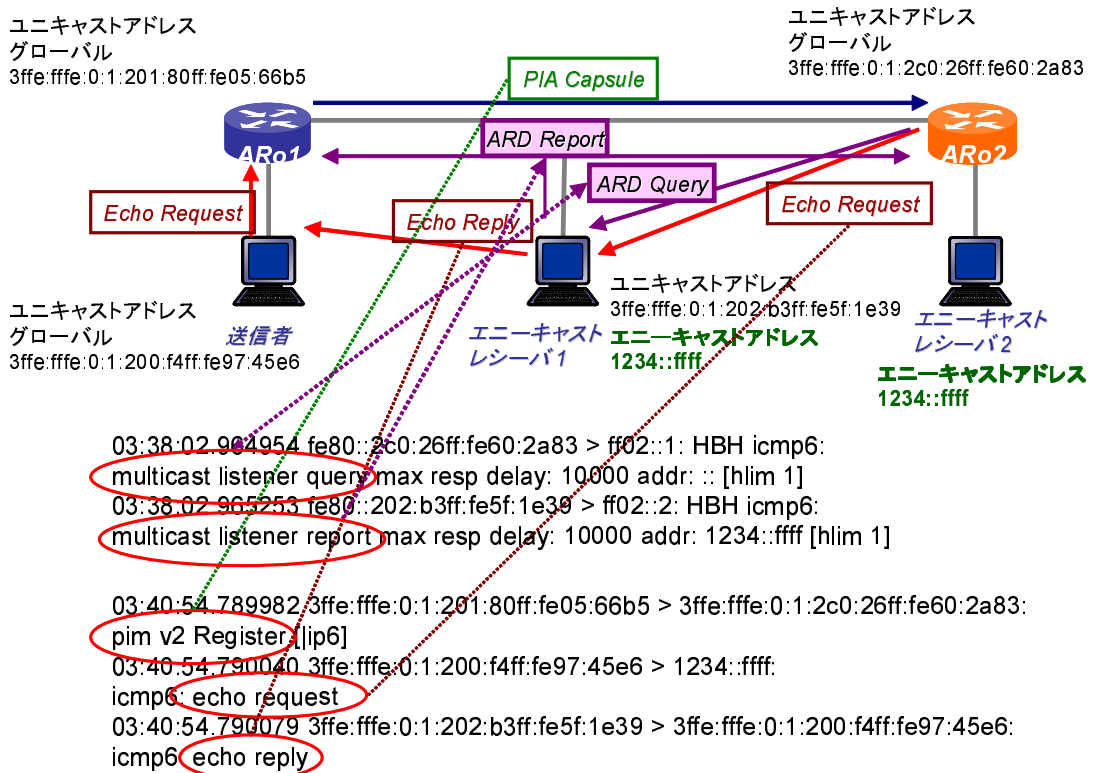


図 23: 複数台のルータによるエニーキャストパケット転送の結果

ブーポイントへカプセル化して転送し、ランデブーポイントからエニーキャストパケットとしてエニーキャストレシーバへパケットが転送されることが確認できた。

4 おわりに

本報告では、IPv6 で新たに導入されたエニーキャスト通信を実現するために必要なエニーキャストルーティングプロトコル PIA-SM を設計した。そして、PIA-SM ルータを実機に実装し、エニーキャストパケットが PIA-SM ルータによって作成された経路にしたがってエニーキャストレシーバに到達することを示した。

本報告で作成した PIA ルータは、最初に作成した経路のエントリが無効になるまで経路を変更しない仕様になっているが、今後、何らかの最適な経路を選択する基準を導入し、最適な経路を選択する必要がある。この最適さを判断する基準や経路選択アルゴリズムの PIA-SM プロトコルへの実装は今後の課題である。また、本報告ではエニーキャストアドレスへの経路の作成、およびエニーキャストパケットの転送方法を示したが、実験環境は非常に小さいネットワーク構成であるため、今後、広域ネットワークにおける転送実験による性能評価、およびその時に生じる問題点について議論する必要がある。これらが、PIA-SM によるエニーキャスト通信を実現するための今後の課題となる。

謝辞

本報告を終えるにあたりまして、適切な御指導、御教授を頂きました大阪大学サイバーメディアセンター先端ネットワーク環境研究部門村田正幸教授に心からお礼申し上げます。

また、本報告の作成に日頃から熱心に、指導および助言をして頂きました大阪市立大学の阿多信吾講師、日本電気株式会社の北村浩氏に深く感謝致します。

並びに適切な助言を頂きました大阪大学情報科学研究科宮原秀夫教授、若宮直紀助教授、大崎博之助教授、長谷川剛助教授、荒川伸一助手、牧一之進助手に心から感謝致します。

最後に日頃から、本報告の作成にあたって様々な相談に答えて頂きました Ibrahim Khalil 氏、土居聡氏、大下裕一氏をはじめとする村田研究室および宮原研究室の皆様方に心より御礼申し上げます

参考文献

- [1] S. Deering and R. Hinden, “Internet protocol, version 6 (IPv6) specification,” *RFC2460*, Dec. 1998.
- [2] S. Doi, S. Ata, H. Kitamura, and M. Murata, “Protocol design for anycast communication in IPv6 network,” in *Proceedings of 2003 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM’03)*, pp. 470–473, Aug. 2003.
- [3] D. Estrin, D. Farinacci, A. Helmy, D. Thaler, S. Deering, M. Handley, V. Jacobson, C. gung Liu, P. et Sharma, and L. Wei, “Protocol independent multicast-sparse mode (PIM-SM): Protocol specification,” *RFC2117*, June 1998.
- [4] D. Waitzman, C. Partridge, and S. Deering, “Distance vector multicast routing protocol,” *RFC1075*, Nov. 1988.
- [5] J. Moy, “Multicast extensions to OSPF,” *RFC1584*, Mar. 1994.
- [6] S. Deering, W. Fenner, and B. Haberman, “Multicast listener discovery (MLD) for IPv6,” *RFC2710*, Oct. 1999.
- [7] B. Haberman and D. Thaler, “Host-based anycast using MLD,” *Internet draft draft-haberman-ipngwg-host-anycast-01.txt*, May 2002. (Expired November 2002).
- [8] T. Narten, E. Nordmark, and W. A. Simpson, “Neighbor discovery for IP version 6 (IPv6),” *RFC2461*, Dec. 1998.