

推薦論文

モバイルマルチキャスト向け グループ管理プロトコルの提案と評価

上野 英俊[†] 鈴木 偉元[†] 石川 憲洋[†]
木村 成伴^{††} 海老原 義彦^{††}

我々は、モバイルマルチキャスト向けの新しいグループ管理プロトコル MMGP (Mobile Multicast Group Management Protocol) を提案する。MMGP は、従来の IGMP (Internet Group Management Protocol) を代替するものとして、無線 LAN や移動通信網等の無線ネットワークで利用されることを想定している。そのため MMGP は、グループ管理に必要な無線通信コストの低減や携帯電話等のモバイル端末における消費電力の低減効果があるように設計されている。また MMGP は、受信者が移動する状況においても適切にグループ管理が行えるように設計されている。さらに MMGP は、受信者のアクセス制御等のマルチキャスト DoS (Denial of Service) への対処も考慮されている。MMGP は、以上を実現するために、グループメンバの代表者のみのグループ加入状況をアクセッスルータにおいて管理することでグループ管理を実現する。逆に代表者以外のグループメンバについては、グループ加入状況をアクセッスルータにおいて特に管理しないことで通信コストの低減を図る。我々は、MMGP の採用によりグループ管理に必要な無線通信コストの低減やモバイル端末における消費電力の低減効果があることを、シミュレーションによる IGMP との性能比較により示す。

MMGP: A Group Management Protocol for Mobile Multicast and Its Evaluation

HIDETOSHI UENO,[†] HIDEHARU SUZUKI,[†] NORIHIRO ISHIKAWA,[†]
SHIGETOMO KIMURA^{††} and YOSHIHIKO EBIHARA^{††}

We propose a new group management protocol for mobile multicast called Mobile Multicast Group Management Protocol (MMGP). We designed MMGP so that it may be optimized for mobile networks such as wireless LANs and cellular networks, and replaced with Internet Group Management Protocol (IGMP) under such environments. To this end, MMGP reduces group management communication cost as well as the power consumption of mobile terminals such as cellular phones. It also takes account of the situation where receivers move frequently. It also provides receiver access control in order to counter multicast Denial of Service (DoS) attacks. To realize the above mentioned functions, an access router only manages the membership condition of a representative member in a sub-network. On the other hand, the access router does not strictly manage the membership condition of the other members, so that MMGP may enable to reduce group management communication cost. Our simulation results show that MMGP can achieve group management at lower communications cost and lower power consumption than IGMP.

1. はじめに

IP マルチキャストは、特定多数のクライアント (受

信者) に対してデータを同報配信することが可能な技術であり、古くから IETF (Internet Engineering Task Force) において標準化が行われてきた^{1),2)}。IP マルチキャストは、動画像等の大容量データを配信する 1 対多の放送型データ配信を行う際に特に効果的であり、バックボーンネットワークや LAN 上における

[†] 株式会社 NTTドコモサービス&ソリューション開発部
Service and Solution Development Department, NTT
DoCoMo, Inc.

^{††} 筑波大学大学院システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineer-
ing, University of Tsukuba

本論文の内容は 2006 年 2 月のモバイルコンピューティングと
ユビキタス通信研究会にて報告され、MBL 研究会主催により
情報処理学会論文誌への掲載が推薦された論文である。

データ配信技術としての利用実績がある。

一方、無線 LAN や移動通信網等の無線を用いた通信ネットワーク（以下無線ネットワークと呼ぶ）では、資源が限られた無線を通信に利用するために、イーサネット等の有線ケーブルを用いた通信ネットワーク（以下有線ネットワークと呼ぶ）と比べて通信コストが高い³⁾。したがって、無線共通チャンネル上でマルチキャストを利用することにより、多数の受信者に対してデータの同報配信を実現することを目指した研究開発、標準化が近年になって増加している。たとえば、移動通信に関する標準化団体である 3GPP (3rd Generation Partnership Project) では、移動通信網上の放送型データ配信技術である MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Services) の標準化を行っている⁴⁾。そのほかにも、IP マルチキャストを用いた動画のストリーミング配信を公衆無線 LAN 上で実現したみあこキャスト⁵⁾のような実用化例が存在する。以上のような放送型データ配信サービス実現への需要の高まりから、マルチキャスト技術を無線ネットワークに適用するためのモバイルマルチキャスト技術への要求が高まっている。

これに対して、マルチキャスト技術のモバイル環境への適用に関する多数の研究が行われてきた。これらの研究の多くは、グループメンバ（以下では単にメンバと略す）がアクセスネットワークの変更をともなって移動（ハンドオーバ）した際に生じる受信データの欠落を防止するためのルーティング方式を重点に検討が行われており、移動通信網や無線 LAN に適用可能なマルチキャストグループ管理プロトコルはあらかじめ与えられていることが暗黙の前提となっている。

しかし、IGMP (Internet Group Management Protocol)^{6),7)}等の既存のマルチキャストグループ管理プロトコルを単純に移動通信網や無線 LAN に適用すると弊害が生じる。たとえば、無線を利用した通信では、フェージング等の影響によりビットエラー率が高いため、有線による通信と比較してパケット落ちが発生する可能性が高くなる。また、文献 8) で指摘されているように IGMP にはマルチキャスト DoS (Denial of Service) 攻撃が可能であるというセキュリティ上の問題があるため、マルチキャストグループに加入する受信者に対して受信者認証を行う必要がある。さらに、IGMP を適用した場合、そのパケットが通信コストの高い無線区間を流れることから、その通信量を低減させる必要があるほか、電源断や移動によりメンバとの接続が突然途絶えた場合の対策も必要である。以上の問題の背景として、IGMP は、通信

路を複数受信者で共有するイーサネット等の有線ネットワークで利用されることを前提に設計されており、元々無線ネットワークでの利用を想定して設計されなかったことがあげられる。以上をふまえ、本論文ではモバイルマルチキャスト向けグループ管理プロトコル MMGP (Mobile Multicast Group Management Protocol) を提案する。

2. MMGP で解決すべき課題

本章では、IGMP の概要を説明し、マルチキャストグループ管理プロトコルのモバイルマルチキャストへの適用に関する既存研究についてまとめ、MMGP で解決すべき課題を明らかにする。

2.1 IGMP の概要

IGMP は、IP マルチキャストを実現するためのプロトコルの 1 つであり、アクセスルータが、自身の個々のインタフェースに接続された物理ネットワーク上に、個々のマルチキャストグループに参加している受信者が存在するか否かを管理するために使用するプロトコルである。

IGMP は、いくつかのバージョンが存在する。IGMP には、初期の IGMP から機能拡張を行った IGMPv2⁶⁾が主に使用されてきた。IGMPv2 のメッセージとして、受信者がマルチキャストグループに加入するために送信する IGMP 加入要求 (IGMP Membership Report) やマルチキャストグループから離脱する際に送信する IGMP 離脱要求 (IGMP Leave Group) が存在する。またアクセスルータが、配下にメンバが存在するか否かを確認する IGMP 問合せ (IGMP Query) が存在する。IGMP 問合せには、あるグループのメンバのみを対象とするグループ特定問合せ (Group-Specific Query) とすべてのグループのメンバを対象とする一般問合せ (General Query) が存在する。グループ特定問合せは、グループのあるメンバが離脱した際に他のメンバがまだ存在しているかを確認するために用いられる。また、一般問合せは、アクセスルータが一定間隔（デフォルトは 125 秒）でサブネットワーク内のすべてのマルチキャストグループのメンバの存在を確認するために用いられる。

IGMPv2 は、そのメッセージの宛先アドレスとしてマルチキャストアドレスを使用するため、ある受信者やルータが送信したメッセージは他の受信者やルータで基本的に受信可能である。IGMPv2 では、この特徴を利用し、IGMP 問合せ後の IGMP 加入要求は最低 1 台のメンバが送信すればよく、また、IGMP 離脱要求をすべてのメンバが送信する必要がないとい

う送信抑制 (Suppression) 機能を保持している。逆に、IGMP では、加入要求等の各種メッセージに対する送達確認 (ACK) が存在しないため、メッセージの欠落による未到達が検出不可能である。そこで IGMP では、同じメッセージを複数回送信 (連送) することでメッセージ未到達となる確率を低減させている。なお IGMPv2 では、Robustness-Variable として 2 回の連送がデフォルト値となっている。以上のように IGMPv2 では、マルチキャストグループ管理を実現するための各種機能を備えている。

IGMPv2 は、その後様々なルータや PC 等の端末に対して実装されたが、任意の送信者によるデータ送信が可能である ASM (Any Source Multicast) であったため、送信データ詐称等のセキュリティの課題が指摘されていた。そこで IETF では、特定の送信元からのマルチキャストデータのみを受信を実現する SSM (Source Specific Multicast) 機能が追加された IGMPv3⁷⁾ を規定した。IGMPv3 では、SSM 機能に加えて、アクセスルータがすべてのメンバの状態を管理する機能を備えており、すべてのメンバが IGMP 加入要求と IGMP 離脱要求を送信する仕組みになっている。したがって IGMPv3 では、送信抑制機能を提供しない代わりに、アクセスルータがメンバからの離脱要求受信時に、グループ指定問合せを送信せずに当該メンバのグループ加入情報を削除する機能 (Fast Leave) が利用可能である。

IGMP は、IPv4 (IP Version4) 向けに使用されるものであり、ほかに IPv6 (IP Version6) 向けに使用される MLD (Multicast Listener Discovery) が存在する。IGMP と MLD の基本機能は同等であるため、以後では IGMP のみについて述べることにする。

2.2 関連研究

マルチキャストのモバイル環境への適用に関しては、これまでに多数の研究が存在する。これまでの研究の多くは、受信者がアクセスネットワークの変更をともなって移動 (ハンドオーバー) した際にも受信データの欠落を防止するモバイル向けマルチキャストルーティングに関するものである^{9),10)}。マルチキャストルーティングの実現方法は双方向トンネリングおよびリモートサブスクリプションの 2 方式が基本になっており、これらに対する様々な拡張方式が存在する^{11)~13)}。

しかし、モバイルマルチキャストに関するこれまでの研究では、IGMP 等のマルチキャストグループ管理プロトコルをモバイル環境へ適用した場合について検討した例は少ない。たとえば、文献 14) は、IGMP 加入要求や IGMP 離脱要求を 1 つのメッセージにまと

めることによりそのデータ量の削減を図る方法を提案している。しかしこの論文は、IGMP 問合せによる通信量増大の問題やセキュリティ機能についての考察がされておらずモバイル環境に適用するための検討が不十分である。

文献 15) は、ポイントトゥポイントネットワーク上の IGMP の適用について検討し、Join/Leave メカニズムを提案している。Join/Leave メカニズムでは、すべてのメンバが IGMP 加入要求と、IGMP 離脱要求を送信し、IGMP 問合せについては実行しない方式を提案している。Join/Leave メカニズムは、ポイントトゥポイントネットワークに適用した場合に、グループ管理に必要なトラフィック量を IGMP よりも低減させることができるという利点がある。また、Join/Leave メカニズムには、受信者における IGMP 問合せの待ち受けが不要であるため、端末の消費電力の低減が可能である等の利点もある。しかし、Join/Leave メカニズムでは、受信者のハンドオーバー発生を何らかの方法で検出可能であることを前提としており、無線 LAN のように受信者のハンドオーバーの状況がアクセスルータにおいて検出不可能な状況を検討していないという問題点がある。また、Join/Leave メカニズムでは、無線ネットワーク等を用いた場合のように下り通信に無線共通チャネルを利用可能な状況を考慮しておらず、このような状況に適用した場合の検討が十分であるとはいえない。さらに、Join/Leave メカニズムでは、マルチキャスト DoS (Denial of Service) 等のセキュリティに対する検討が行われておらずモバイル環境に適用するための検討が不十分である。

モバイル環境にマルチキャストグループ管理を適用することに着目した研究例は以上の研究以外に存在せず、本分野に関する研究は十分でないといえる。

以上のことから本論文では、IGMP 等のマルチキャストグループ管理プロトコルをモバイル環境に適用した場合の課題を解決する新しいモバイルマルチキャスト向けグループ管理プロトコル (MMGP: Mobile Multicast Group Management Protocol) を提案する。

2.3 無線を利用した通信の課題

以下では、MMGP の要求条件を明らかにするために、無線を利用した通信において考慮すべき課題について整理する。

● 無線区間の通信コスト

無線通信に利用可能な周波数は限られているため一般的に無線通信は有線通信と比較してコスト高である。したがって、無線区間の通信量を低減させることが重要である。

- 端末の消費電力

携帯電話を受信者として利用する場合には、その処理能力（CPU、電源容量）に制限があるため、受信者におけるデータ送受信パケット数（処理パケット数）を低減させる必要がある。受信者における処理パケット数を低減させることにより、受信者における通信処理を低減させることが可能になるため、たとえば携帯電話の待ち受け時間（利用可能時間）の延長を図ることが可能となる。

- 受信者の移動（ハンドオーバー）等

無線を利用した通信においては、受信者の突然の電源断や移動にともなう受信者の圏外流出が頻繁に発生する可能性がある。このことにより、たとえば IGMPv3 のようにアクセルルータがメンバの状態（アクセスネットワークの在籍状況等）を管理する場合には、そのアクセルルータとメンバのそれぞれが保持する状態情報の不一致が発生する可能性がある。また、発生した状態不一致（準正常状態）を検出し、準正常状態から正常状態に復帰するまでに本来不必要な通信が発生する可能性がある。

2.4 MMGP に求められる要求条件

2.3 節に述べた課題を考慮すると、IGMP をモバイル環境に適用した場合にいくつかの問題点が明らかになる。以下では、これらの問題点について検討し、MMGP に求められる要求条件として整理する。

- 要求条件 ①：メッセージの連送による不要な通信を削減

IGMP では、連送機能によりメッセージを複数回連送することでメッセージ未到達の確率を低減させている。しかし、この対処により無線区間の通信量を不要に増大させる要因となるため、MMGP ではメッセージの連送を必要としないグループ管理方式を検討する必要がある。

- 要求条件 ②：IGMP 問合せによる受信者処理パケット数の削減

IGMP 問合せは、多数の受信者がこれを処理する必要がある。したがって、受信者が電源容量に制限のある携帯電話等の場合には消費電力を増大させる要因となり、結果として待ち受け時間の低下を招く。したがって MMGP では、問合せによる通信の影響を最低限の受信者のみに抑えることで受信者全体の処理量を低減させる必要がある。

- 要求条件 ③：IGMP の送信抑制機能が働かない状況を考慮

イーサネットを用いた LAN 等の通信路を受信者で共有する有線ネットワークを通信に用いる場合、ある

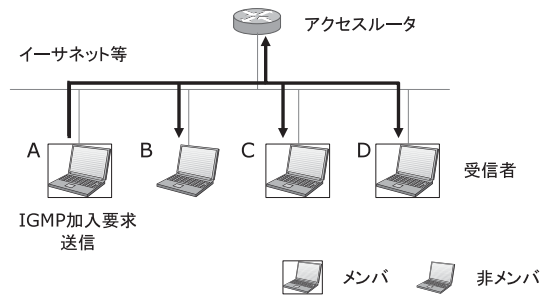


図 1 有線 LAN における IGMP 加入要求の伝達例

Fig. 1 An example of transmitting IGMP membership report over wired LAN.

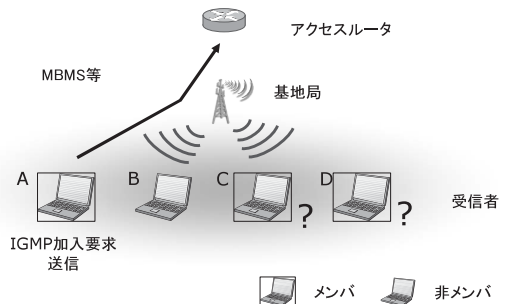


図 2 MBMS における IGMP 加入要求の伝達例

Fig. 2 An example of transmitting IGMP membership report over MBMS.

メンバが送信した IGMP メッセージはすべてのサブネットワークに伝わるため、サブネットワーク中のすべてのメンバが当該メッセージを受信する（図 1）。一方、無線通信においても複数のメンバで同一の無線共通チャネルを共有するため、あるメンバが送信した IGMP メッセージは、サブネットワーク中のすべてのメンバにより受信されるのが基本である。ただし、移動通信網向けに設計された MBMS では、上りの IGMP メッセージは、個別チャネルを用いてアクセルルータに対してのみ送信されるため⁴⁾他のメンバが受信することができない。つまり MBMS においては、あるメンバが送信した IGMP 加入要求や IGMP 離脱要求は他のメンバが受信することはなく、IGMP の送信抑制機能が働かない（図 2）。なお、無線 LAN の場合には、上りと下りの通信で同じ無線チャネルを使用するため、あるメンバが送信した IGMP メッセージは無線基地局を経由せずに他のメンバに直接届く場合もある。しかし、無線 LAN における隠れ端末問題¹⁶⁾の要因と同様に、IGMP メッセージ送信者から距離の離れたメンバに対してはこのメッセージが届かない場合がある。したがって、無線 LAN においても MBMS の場合と同様に IGMP の送信抑制機能が働かない場合がある。

したがって、MMGP では、IGMP の送信抑制機能が働かない上記のような状況を考慮して設計される必要がある。

- 要求条件 ④：メンバの移動（ハンドオーバ）による通信発生を低減

モバイル環境では、メンバが移動する際に、IGMP 加入要求や離脱要求を送信せずにサブネットワークを変更することがある。したがって、IGMPv3 では、アクセスルータが管理するメンバの加入状況と、実際のメンバの在籍状況の状態不一致が発生する可能性がある。その結果、IGMPv3 の Fast Leave 機能が正確に働かない要因になる。また、この状態不一致が発生すると、それを解消するための通信がさらに必要となる。したがって、MMGP では、受信者の移動が頻繁に発生するモバイル環境において、メンバの離脱を効率的に管理できる必要がある。

- 要求条件 ⑤：マルチキャスト DoS への対処

IGMP では、任意の受信者がデータ受信の開始を要求できるため、手当たり次第にグループに加入し、マルチキャスト配信経路を不必要に構築するマルチキャスト DoS の問題が存在する⁸⁾。マルチキャストグループからの離脱に際しても不必要な通信処理を発生する同様な問題が存在する。特にモバイル環境においては、受信者が直接ケーブル等で接続されておらず、問題を発生させた受信者を特定することが難しいため、受信者認証が特に重要である。MMGP では、文献 8) に紹介されるマルチキャスト DoS 対策と同様に、マルチキャストグループに加入する最初のメンバと、マルチキャストグループに最後まで残っているメンバについて受信者認証を行い、その正当性を判断する必要がある。

我々は、以上に説明した 5 つの要求条件を満たす MMGP を提案する。次章では、MMGP の詳細について説明する。

3. MMGP の提案

3.1 方式概要

本節では、2.4 節に説明した 5 つの要求条件を満たす新しいモバイルマルチキャスト向けグループ管理プロトコル MMGP を提案する。

マルチキャストでは、データの配信を希望するメンバが配下に存在すれば、その数が何台であったとしても、アクセスルータは配信データの中継を行う必要がある。このため、マルチキャストグループ管理プロトコルの本来の目的は、このようなメンバがアクセスルータ配下に存在するか否かを把握できる機能を提供することだといえる。MMGP ではこの点に着目し、

メンバの中から選択した 1 台のメンバのグループ在籍状況をアクセスルータにおいて集中的に管理する。そして、選択したメンバを識別するためにトークンを用いる方法を提供する。

MMGP の動作の概要は以下のとおりである。

- MMGP ルータ（MMGP をサポートしたアクセスルータ）は選択した 1 台のメンバに対してトークンを与え、これらのメンバ（トークンメンバと呼ぶ）のグループ在籍を定期的に確認する等の厳密な管理を行う。つまり MMGP ルータは、ユニキャストを用いた送達確認によりトークンメンバの在籍確認を行うことで、IGMP で問題であったメッセージの連送や問合せ処理の問題、さらには IGMP における送信抑制機能が無線ネットワークでは有効ではないという問題を解決する（要求条件 ① ② ③ への対処）。
- MMGP では、1 台のメンバにトークンを与えるため、最初にマルチキャストグループに加入するメンバ、およびマルチキャストグループから最後に離脱する（可能性がある）メンバ（マルチキャストグループに他のメンバがいない状態のメンバ）は必然的にトークンメンバとなる。
- トークンを与えられないメンバ（非トークンメンバと呼ぶ）の状態管理は重要ではないため、MMGP ルータは、非トークンメンバのグループへの加入や離脱を把握する必要がなく、たとえば非トークンメンバが移動により他のサブネットワークに移動した場合や、電源断等により突然通信ができなくなった場合でも特に処理は行わない。以上により、非トークンメンバの移動にともなう通信を削減する（要求条件 ④ への対処）。
- トークンメンバが離脱した場合には、非トークンメンバを選択して、これにトークンを再割当てる。
- MMGP ルータは、トークンメンバが配下に存在する限りマルチキャスト配信データの中継を行う。トークンメンバが存在するという事は当該マルチキャストアドレスの配信データを受信するメンバが最低 1 台存在することを意味するためである。
- MMGP では、トークンメンバの加入時および離脱時に受信者認証を実行する。これは、最初にグループに加入するメンバ、および最後にグループから離脱するメンバは必ずトークンメンバになるという点に着目したものである。これによってマルチキャスト DoS 対策が可能となる（要求条件 ⑤ への対処）。

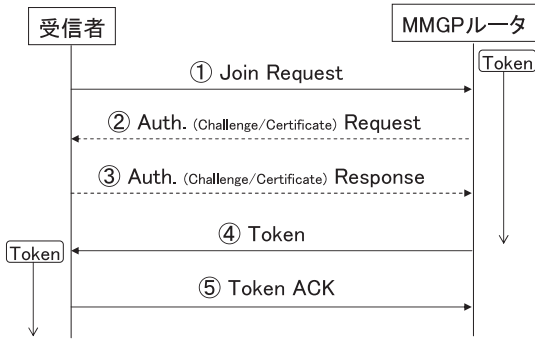


図3 トークンメンバの加入 (MMGP Join) 手続き
 Fig.3 Join procedure for the token member (MMGP Join).

次節以降では、以上で説明した MMGP の基本動作の詳細について説明する。

3.2 通信シーケンス

本節では、MMGP の詳細について通信シーケンスを用いた具体例を用いて説明する。

(1) トークンメンバの加入 (MMGP Join)

受信者が最初にマルチキャストグループに加入する際には、以下に示すトークンメンバの加入手続きが実行される (図3)。

① 受信者が MMGP Join Request を送信すると、MMGP ルータは、当該マルチキャストグループに加入しようとする最初のメンバか否かを判断する。MMGP Join Request には受信者が加入を希望するマルチキャストアドレスが含まれており、MMGP ルータは当該マルチキャストアドレス宛の配信データの中継を開始済みか否かを判断することによって最初のメンバであるか否かを判断可能である。ここで、MMGP ルータがマルチキャスト DoS 対策を必要とする場合には、②③に示す受信者認証手続きを実行してもよい。なお、本図中の点線はその実行がオプションであることを示している。受信者認証ではチャレンジ認証もしくは電子証明書による認証を選択し、MMGP ルータが受信者に対して要求する (② Authentication Request)。これに対して、受信者は MMGP ルータからのチャレンジ値に対するレスポンス値、もしくは電子証明書を返す (③ Authentication Response)。以上の動作により、MMGP ルータは、受信者認証が可能となる。受信者認証が必要か否かは MMGP ルータが判断し、必要な場合に ② Authentication Request を送信することで受信者は受信者認証が必要であることを認識することができる。次に、受信者に対してトークンを付与する (④)。トークンに対して電子証明書を付加することにより、受信者は、MMGP ルータが発行したト



図4 非トークンメンバの加入 (MMGP Join) 手続き
 Fig.4 Join procedure for the non-token member (MMGP Join).

クンであることの検証が可能となる。その後、トークンが到達したことを MMGP ルータに伝えるため、受信者は ⑤ 送達確認 (Token ACK) を送信する。なお、MMGP ルータは、① の MMGP Join Request の受信、もしくは ③ の受信者認証完了後、必要に応じてマルチキャストツリーの構築を行い、マルチキャストデータの中継を開始する。以上に説明したトークンメンバの加入に関する一連の通信はすべてユニキャストで実行される。

(2) 非トークンメンバの加入 (MMGP Join)

他のメンバがすでに存在するマルチキャストグループに受信者が加入する場合には、非トークンメンバの加入手続きが実行される (図4)。受信者は、図3における加入手続きと同様に MMGP Join Request を送信する (①)。MMGP ルータは、本メッセージを受信した時点で2番目以降のメンバ (つまり非トークンメンバ) の加入要求であることが判断可能なため、この時点で処理は終了する。なお、受信者は、すでに当該マルチキャストグループ宛のデータの受信を検出する等、何らかの方法ですでにマルチキャストグループに加入しているメンバが他に存在するということが検出可能であれば、MMGP Join Request の送信を省略できる。つまり非トークンメンバに関しては MMGP Join Request の送信は必ずしも必要ではない。ただし、他のメンバがマルチキャストグループに加入しているか否かは、当該マルチキャスト配信データの受信で検知するのが典型であるため、基本的に MMGP Join Request の送信はすべての受信者が必要とされる機能である。なお、以上に説明した非トークンメンバの加入に関する一連の通信はすべてユニキャストで実行される。

(3) 非トークンメンバの離脱 (MMGP Leave)

非トークンメンバは、① MMGP Leave Request をユニキャストで送信することでマルチキャストグループから離脱する (図5)。MMGP ルータは、非トークンメンバの離脱の把握が必ずしも必要ないため、本メッセージは省略することも可能である。

(4) トークンメンバの離脱 (MMGP Leave)

トークンメンバがマルチキャストグループから離脱



図 5 非トークンメンバの離脱 (MMGP Leave) 手続き
 Fig. 5 Leave procedure for the non-token member (MMGP Leave).



図 6 トークンメンバの離脱 (MMGP Leave) 手続き
 Fig. 6 Leave procedure for the token member (MMGP Leave).

する際には、以下に示すトークンメンバの離脱手続きが実行される (図 6)。① 受信者は、先に受信していたトークンを MMGP Leave Request メッセージ中に付加して MMGP ルータに送信する。MMGP ルータは受信したトークンを確認し、自分で発行したものであるかの検証を行う。ここで、マルチキャスト DoS 対策の必要性に応じ、② ③ 受信者認証手続きを実行してもよい。なお、離脱時のトークンメンバ認証は、トークンメンバの加入時の認証よりも重要性が低い。MMGP ルータは、トークンに対して電子署名を付加することにより、自身が配布したトークンであるか否かの検証が可能であるため、受信者を認証せずともかつて自身がトークンメンバ加入手続きに認証したことを判定可能であることがその理由である。最後に、④ トークンを受信したことを示す MMGP Leave ACK メッセージを返信する。なお、以上に説明したトークンメンバの離脱に関する一連の通信はすべてユニキャストで実行される。

(5) トークン再割当て

MMGP では、1 台のメンバに対してトークンを付与することが原則であるため、トークンメンバの離脱が発生した場合には、トークンを他のメンバに再割当てする必要がある (図 7)。MMGP ルータは、トークン再割当てが必要だと判断すると、① メンバが加入しているマルチキャストグループに対して MMGP Query メッセージを送信する。② それを受信した各メンバは MMGP Join Request を送信することでメンバとして在籍していることを MMGP ルータに対し

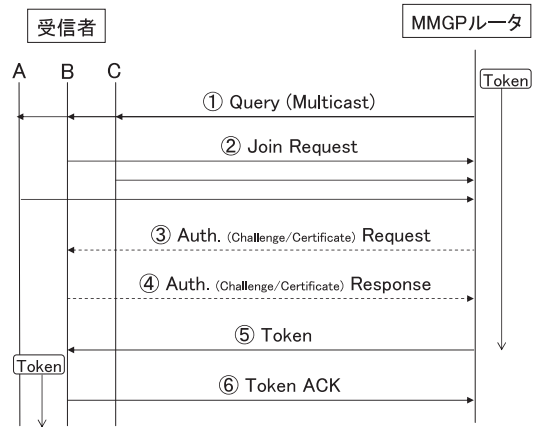


図 7 トークン再割当て手続き
 Fig. 7 Token reassignment procedure.

て伝える。MMGP ルータは、MMGP Join Request を受信したメンバの中から 1 台をトークンメンバとして決定するが、③ ④ この際マルチキャスト DoS 対策が必要な場合には、受信者認証処理を実行してもよい。なお、MMGP ルータがトークンを再割当てするのは、MMGP Query 送出後に最初に MMGP Join Request を受信したメンバとする。そのために各メンバは、MMGP Query を受信した後、MMGP Query で指定された時間を上限とするランダムな時間を各自選択して MMGP Join Request を送信する。これにより、MMGP ルータへの MMGP Join Request の集中を避けるという効果もある。⑤ ⑥ そして、決定したメンバに対して図 3 と同様にトークン付与のための手続きを行う。なお、残存メンバが存在しない場合には、MMGP Join Request を送信する受信者が存在しないため、MMGP ルータは MMGP Join Request 待ちタイマの満了を待ってマルチキャスト配信の中継を停止する。なお、以上に説明したトークン再割当てに関連する一連の通信は、MMGP Query のみがマルチキャストで実行され、それ以外の一連の通信はすべてユニキャストで実行される。

(6) トークンメンバの在籍確認 (Hello)

MMGP では、トークンメンバのグループ在籍状況を把握するために定期的にトークンメンバの在籍確認を行う (図 8)。① MMGP ルータは、定期的に MMGP Hello メッセージをトークンメンバに対して送信する。② それに対して受信者は、MMGP Hello ACK によって在籍していることを MMGP ルータに伝える。以上の MMGP Hello と MMGP Hello ACK はユニキャストを用いて通信される。MMGP ルータは、MMGP Hello メッセージ待ちタイマの満了をもってトークン



図 8 トークンメンバの在籍確認 (Hello)

Fig. 8 Token membership check (Hello).

メンバの不在を検知することが可能であり、その後、図 7 に示すトークン再割当て手続きを実行する。

4. MMGP の評価

4.1 評価項目

本章では、ns¹⁷⁾ を用いたネットワークシミュレーションにより MMGP と、IGMP の 2 種類のバージョン (IGMPv2⁶⁾ と IGMPv3⁷⁾) を比較し、提案方式の有効性を評価する。このとき、評価する項目は以下の 2 項目である。

- 通信シーケンス数

MMGP および IGMP の処理に必要なネットワーク全体のトラフィック量を評価するため、MMGP および IGMP の通信シーケンス数を測定する。ここで、通信シーケンス数とは、アクセスルータおよび受信者において、送信した MMGP もしくは IGMP のパケット数の合計のことを意味する。また、MMGP および IGMP それぞれのメッセージ種別ごとのシーケンス数についても測定する。特に無線を用いたネットワークにおいて MMGP または IGMP を適用する場合には、通信シーケンス数とその方式に必要な通信コストが比例するため、通信シーケンス数がより少ない方式がモバイル向けマルチキャストグループ管理プロトコルとして優れていると考えることができる。

- 受信者の処理パケット数

MMGP および IGMP の処理に必要な受信者における処理量を評価するため、MMGP および IGMP の受信者の処理パケット数を測定する。ここで、受信者の処理パケット数とは、受信者が送信および受信した MMGP もしくは IGMP のパケット数の合計のことを意味する。受信者における各パケットの処理には CPU による処理やメモリの利用がともなうため、これにより受信者が利用する端末の電力を消費する。消費電力を低くすることは、たとえば、受信者に携帯電話を用いる場合の待ち受け時間の改善につながることから、処理パケット数が少ないほうがモバイル向けマルチキャストグループ管理プロトコルとして優れている方式と考えることができる。

本論文では、以上の 2 項目の評価をするにあたり、利用するネットワークとして以下の 2 種類を想定する。

- 有線ネットワーク

IGMP は、有線ネットワークでの利用を前提に当初設計されており、逆に MMGP を有線ネットワークに適用すると問題が発生するのかどうかを確認する必要がある。そこで、評価に用いるネットワークの 1 つとして、有線ネットワークを採用する。この有線ネットワークにおいては、マルチキャストデータはサブネットワーク上のすべてのメンバにおいて受信可能であり、たとえば、ある受信者が送信した IGMP 加入要求や IGMP 離脱要求は、サブネットワーク上の他のメンバが受信可能であると仮定する。

- 無線ネットワーク (移動通信網、無線 LAN 等)

MMGP はモバイルマルチキャスト向けに設計されていることから、無線ネットワークにおける評価を行う。無線ネットワークでは、ある受信者が送信するマルチキャストデータが他の受信者に届かないことを前提とする。この前提は 2.4 節に説明したように、移動通信網上に MBMS を適用した場合にあてはまる。なお、無線 LAN の場合には、ある受信者が送信したマルチキャストデータが他の受信者に届かない場合にあてはまる。

さらに本論文では、受信者が移動 (ハンドオーバ) する状況を考慮し以下の 2 点について評価を行う。

- 受信者が移動しない状況

有線ネットワークにおいては、受信者はケーブルを通じて接続されるため、受信者の移動を考慮する必要性は少ない。また、無線ネットワークにおいても、無線基地局を受信者が集まるような場所 (喫茶店等) に設置するようなスポット的な利用においては、受信者が移動することにより単に圏外になってしまうため、サブネットワークの変更をとまわらない場合も考えられる。そこで本章では、受信者が移動しない状況を考慮し、その場合の MMGP と IGMP の評価を行う。

- 受信者が移動する状況

無線ネットワークにおいては、受信者はケーブルを通じて接続されていないため、通信を行ったままサブネットワークの変更をとまなう移動を考慮する必要性がある。たとえば IGMP では、受信者が IGMP 加入要求や離脱要求を送信せずにサブネットワークを変更する。MMGP についても受信者が MMGP Join Request や MMGP Leave Request を送信せずにサブネットワークを変更する。したがって、本章では、無線ネットワークに限り、受信者が移動した状況を考慮し、その場合の MMGP と IGMP の評価を行う。

4.2 シミュレーション

性能評価に用いたシミュレーション条件は以下のとおりである。

- 1 台の MMGP ルータで構成するサブネットワーク中に複数の受信者が存在する状況を想定し、メンバ数は 1 台から 200 台の範囲で変化させて測定を行う。MMGP ルータと受信者間は IGMP や MMGP によるマルチキャストグループ管理プロトコルを動作させる。
- 評価実験では、現在の TV 放送の番組枠の平均的長さを考慮し、送信者は 30 分間のデータ配信を行う状況を想定する。受信者は、配信開始前の 5 分間にマルチキャストグループに加入し、データ配信完了後の 5 分間で当該マルチキャストグループから離脱する。5 分間のマルチキャストグループへの加入と、5 分間のマルチキャストグループからの離脱は偏ることなく一様な間隔で行う。
- 受信者が各サブネットワークに滞在する時間は平均 10 分または平均 1 分の指数分布に従う。滞在時間後、サブネットワークの変更が生じる。仮に 1 km のセル半径で構成される円形のエリアを想定した場合に、10 分でこのセルに流入してから流出するには時速約 9 km、1 分の場合には時速約 94 km で移動する必要がある。移動通信網の場合、都市部ではセル半径が 1 km 程度の小さいセルも存在するが、郊外でのセル半径は数 km にも及ぶため、実際の平均滞在時間はこれよりも長くなる。したがって、ここで設定した平均滞在時間は、受信者の頻繁な移動環境を想定するものとして十分であるといえる。
- 通信シーケンス数の比較において、ユニキャストおよびマルチキャストのいずれで送受信された場合でも、通信シーケンス数はパケット 1 つにつき 1 個と数える。これは、無線ネットワークでは共通チャネルを利用することから、マルチキャストはユニキャストと同じ電波リソースを占有するためである。また、以下で示す測定結果では、アクセスルータと受信者で送信したすべての通信シーケンス数の合計を示す。
- 受信者における処理パケット数において、ユニキャストおよびマルチキャストのいずれで送受信された場合でもパケットは 1 つにつき 1 個として数える。たとえば、 n 台のメンバを対象にマルチキャストでのデータ配信を行った場合には、受信者の処理パケット数は合計 n 個となる。また、以下で示す測定結果では、受信者すべての処理パケッ

ト数の合計数を示す。

- 受信者が移動する際には移動元のサブネットワークに対して IGMP 離脱要求や MMGP Leave Request 等のメッセージを送信しないものとする。また、移動先のサブネットワークにおいては、他のメンバが必ず存在するものと仮定し、IGMP 加入要求や MMGP Join Request を送信せずともデータ受信を再開することが可能である状況を想定する。
 - 受信者が移動する際にはサブネットワークから受信者が隣接するサブネットワークへ移動するのとともに隣接するサブネットワークから当該サブネットワークに流入する受信者も存在するものと想定する。したがって、一時的に受信者数の変化はあるもののトータルで考えた場合のサブネットワーク内に在籍する受信者数は一定である。
 - MMGP と IGMP パケットの欠落は発生しないものとする。
- MMGP では、さらに以下の条件を仮定している。
- 非トークンメンバの MMGP Leave Request は実行されないものとする。3.2 節に説明したように MMGP Leave Request については省略可能であることがその理由である。
 - MMGP と IGMP の同等機能提供時の評価を行うため、IGMP が提供していない受信者認証手順を MMGP でも使用しない。
 - MMGP における受信者へのトークンの割当てはランダムに行う。
 - MMGP Hello は IGMP における一般問合せと同等機能を提供するため、MMGP Hello 間隔を IGMP の一般問合せ間隔のデフォルト値と同じ 125 秒とする。

4.3 評価結果

4.3.1 通信シーケンス数の比較

まず、IGMP や MMGP による通信に必要な通信シーケンス数の比較を行う。

- 有線ネットワークにおける通信シーケンス数の比較

図 9 に、有線ネットワークにおける各グループ管理プロトコルで送られた通信シーケンス数を示す。有線ネットワークにおいては IGMPv2 の通信シーケンス数が一番少なく、IGMPv3 の通信シーケンス数が一番多い。IGMPv3 では、すべてのメンバが IGMP 加入要求と IGMP 離脱要求を送信し、さらに IGMP 加入要求は IGMP 問合せ発生ごとに必要とするため、通信シーケンス数がメンバ数に比例して増加する。それと

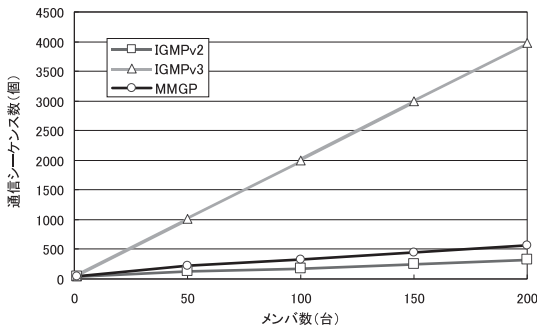


図 9 有線ネットワークにおける通信シーケンス数の比較
Fig. 9 Comparison of the number of communication sequences over wired network.

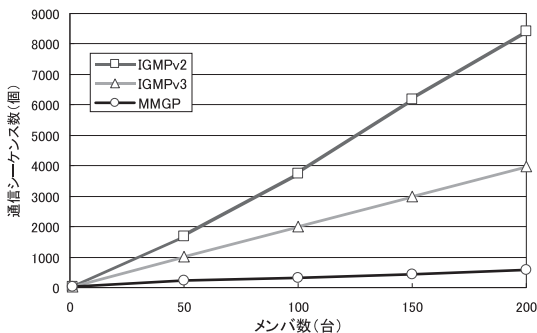


図 10 無線ネットワークにおける通信シーケンス数の比較 (移動なし)
Fig. 10 Comparison of the number of communication sequences over wireless network (receivers do not move).

比較して、IGMPv2 では送信抑制機能により IGMP 問合せ後の IGMP 加入要求は最低 1 台のメンバーが送信すればよく、また、IGMP 離脱要求をすべてのメンバーが送信する必要がないため通信シーケンス数が IGMPv3 と比較して少ない。MMGP においても、最初の MMGP Join Request はトークンメンバーと非トークンメンバーのいずれも送信するが、ユニキャストを用いる MMGP Hello を用いてトークンメンバーに対してのみ在籍確認を行っているため IGMPv3 ほど通信シーケンス数は必要としない。MMGP が IGMPv2 と比較して通信シーケンス数がわずかに上回っている理由は、MMGP ではトークン再割当てに MMGP Query とその後の MMGP Join Request が必要となり、これらの分の通信シーケンス数が増加するためである。

- 無線ネットワークにおける通信シーケンス数の比較 (移動なし)

図 10 に、受信者の移動を考慮しない場合における無線ネットワークにおける通信シーケンス数を示す。無線ネットワークにおいては、MMGP の通信シーケンス数が一番少なく、IGMPv2 の通信シーケンス数が

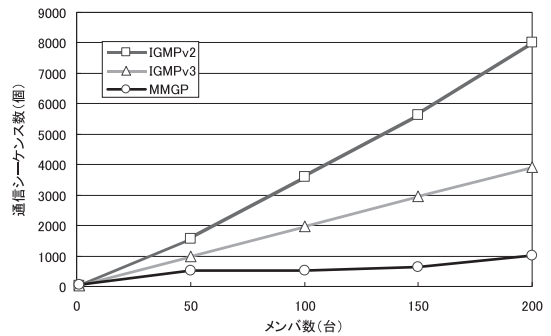


図 11 無線ネットワークにおける通信シーケンス数の比較 (移動あり: 平均滞在時間 10 分)
Fig. 11 Comparison of the number of communication sequences over wireless network (receivers move: average stay time = 10 minutes).

一番多い。無線ネットワークにおいては、IGMP 加入要求が他のメンバーによって受信されないため、結果的に IGMP 加入要求と IGMP 離脱要求がすべてのメンバーによって送信されることがその原因である。これは IGMPv2、IGMPv3 のいずれにおいても共通である。ただし IGMPv2 の場合には Fast Leave 機能を持たないため、IGMP 離脱要求後に IGMP グループ特定問合せが発生し、それがさらに IGMP 加入要求を発生させる要因になっている。したがって、IGMPv2 は、IGMPv3 と比較しても通信シーケンス数が多くなっている。これに対して MMGP では、MMGP Hello を用いてトークンメンバーに対してのみ在籍確認を行っているため通信シーケンス数の増加を抑えることが可能である。

- 無線ネットワークにおける通信シーケンス数の比較 (移動あり)

図 11 に、受信者が平均滞在時間 10 分でセルを移動する無線ネットワークでの通信シーケンス数を示す。IGMP では、いずれのバージョンにおいても、受信者が移動しない図 10 と比較して、通信シーケンス数の変化は少ないことが分かる。これは、受信者が他のサブネットワークに移動すると同時に、他のサブネットワークからも移動する状況を考慮していることがその要因である。つまり、IGMP の通信シーケンス数は受信者の移動には関係なく、単にアクセスルータ配下のメンバー数に依存することが原因となっている。これに対して MMGP では、トークンメンバーが移動するごとに発生するトークン再割当てに通信が必要であるため、受信者が移動しない状況と比較した場合に、通信シーケンス数が増加している。ただし、トークンメンバーはメンバーの中の代表者 1 台のみが指定されるため、トークンメンバーの移動によるトークン再割当ての影響は少

表 1 IGMP のメッセージ種別ごとのシーケンス数の比較 (メンバ数: 200 台)

Table 1 Comparison of the number of communication sequences of every IGMP message type (The number of the member is 200).

方式	使用ネットワーク (有線/無線)	移動 (有り/無し)	加入要求 (Membership Report)	離脱要求 (Leave Group)	一般問い合わせ (General Query)	グループ特定問い合わせ (Group-Specific Query)	合計
IGMPv2	有線	無し	282	9	20	11	322
		無し	7989	200	20	199	8408
	無線	有り(10分)	7592	200	20	201	8013
		有り(1分)	7637	200	20	201	8058
IGMPv3	有線	無し	3758	200	20	0	3978
		無し	3758	200	20	0	3978
	無線	有り(10分)	3707	200	20	0	3927
		有り(1分)	3723	200	20	0	3943

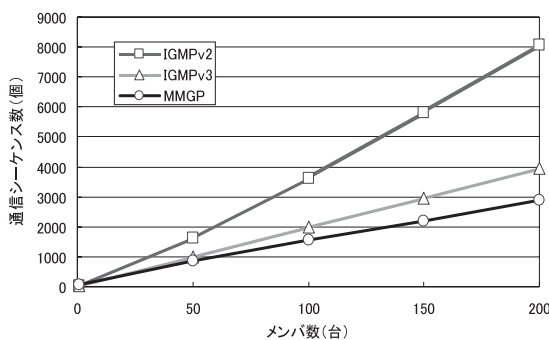


図 12 無線ネットワークにおける通信シーケンス数の比較 (移動あり: 平均滞在時間 1 分)

Fig. 12 Comparison of the number of communication sequences over wireless network (receivers move: average stay time = 1 minute).

ない。評価結果から見ても、MMGP は、IGMPv2 や IGMPv3 と比較して通信シーケンス数は少ないことが分かる。

図 12 に、受信者が平均滞在時間 1 分でセルを移動する無線ネットワークでの通信シーケンス数を示す。IGMP では、いずれのバージョンにおいても、受信者が移動しない図 10 と比較して、通信シーケンス数の変化は少ないことが分かる。MMGP においては受信者の 1 つのセルへの平均滞在時間が短くなるとそれに合わせてトークン再割当てにより通信シーケンス数が増加するが、このように受信者が頻繁に移動する状況においても IGMPv2 や IGMPv3 と比較して通信シーケンス数は少ないことが分かる。

● メッセージ種別ごとのシーケンス数の比較

以下では、IGMP と MMGP それぞれの方式におけるメッセージ種別ごとのシーケンス数を示す。

表 1 は、メンバ数を 200 台とした場合の IGMPv2、

IGMPv3 におけるメッセージ種別ごとのシーケンス数を示している。なお、表中の有線とは有線ネットワークのこと、無線とは無線ネットワークのことを示している。また、移動なしとは受信者が静止している場合のことを示し、移動ありとは、受信者の移動を考慮した場合のことを示しており、時間は 1 つのセルへの平均滞在時間を示す。

IGMPv2 では、有線ネットワークにおける IGMP 加入要求のシーケンス数は少ないが、無線ネットワークにおける IGMP 加入要求のシーケンス数が多いことが改めて確認できる。これは先述のように IGMPv2 の送信抑制機能が有線ネットワークでは有効に働くが、無線ネットワークではこの機能が有効に働かないことがその理由である。なお、IGMPv2 では、過去に IGMP 問合せを受信した後に IGMP 加入要求を送信したメンバのみが IGMP 離脱要求を送信するため、IGMPv2 の送信抑制機能は IGMP 離脱要求のシーケンス数の減少にも効果がある。IGMP 離脱要求のシーケンス数が減少した結果、IGMP グループ特定問合せのシーケンス数も減少するため、全体の IGMP 加入要求のシーケンス数は少なく抑えられる。

IGMPv3 では、使用されるネットワークに関係なくすべてのメンバが IGMP 加入要求と IGMP 離脱要求を送信するため、有線ネットワークと無線ネットワークでの IGMP 加入要求のシーケンス数の差異は小さいことが分かる。また、IGMPv3 では、グループ特定問合せが存在しないため、その分 IGMPv2 と比較して IGMP 加入要求のシーケンス数が無線ネットワークでの利用において少ないことが改めて確認できる。

表 2 は、メンバ数を 200 台とした場合の MMGP のメッセージ種別ごとのシーケンス数を示している。

表 2 MMGP のメッセージ種別ごとのシーケンス数の比較 (メンバー数: 200 台)

Table 2 Comparison of the number of communication sequences of every MMGP message type (The number of the member is 200).

方式	使用ネットワーク (有線/無線)	移動 (有り/無し)	Join Request	Token	Token ACK	Hello	Hello ACK	Leave Request	Leave ACK	Query	合計
MMGP	有線	無し	485	7	7	18	18	7	7	9	558
		無し	485	7	7	18	18	7	7	9	558
	無線	有り(10分)	940	5	5	18	15	2	2	6	993
		有り(1分)	2771	19	19	17	2	4	4	21	2857

なお、表 2 中の各用語は表 1 と同様である。表 2 によると、受信者の 1 つのセルへの平均滞在時間が短くなると、それにともないトークンの再割当ての発生回数が増加し、結果的に通信シーケンス数が増加することが改めて確認できる。MMGP の各メッセージ種別のうちトークンメンバのみ処理が必要となるのは、Token, Token ACK, Hello, Hello ACK, Leave Request, Leave ACK の 6 種類であり、これらのシーケンス数の合計が全体のシーケンス数に占める割合は、移動なし、平均滞在時間 10 分、平均滞在時間 1 分の場合で、それぞれ 12%, 4.7%, 2.3% となる。つまり、受信者の 1 つのセルへの平均滞在時間が短くなると、トークンメンバのみ処理が必要となる通信シーケンス数の割合が減少傾向にあることが分かる。また、トークンメンバ 1 台あたりの通信シーケンス数は、移動なし、平均滞在時間 10 分、平均滞在時間 1 分の場合で、それぞれ 9, 9, 3 シーケンスの増加となり、受信者の 1 つのセルへの平均滞在時間が短くなると 1 台のトークンメンバあたりの通信シーケンス数も減少傾向にある。これは、トークンメンバの移動により、トークンの再割当てが発生し、結果として、トークンを割り当てられるメンバ数が増加することがその理由である。

4.3.2 受信者の処理パケット数の比較

次に、受信者における処理パケット数を比較することにより、MMGP と IGMP における消費電力への影響の評価を行う。

- 有線ネットワークにおける受信者の処理パケット数

図 13 に、有線ネットワークにおける受信者の処理パケット数を示す。有線ネットワークにおいては、IGMPv2 と IGMPv3 の処理パケット数が多く、MMGP の処理パケット数は少ない。また、メンバ数が少ない状況では IGMPv2 の処理パケット数は IGMPv3 と比較して少ないが、メンバ数が増加すると IGMPv2 の処理パケット数が IGMPv3 よりも多い。この理由は、IGMPv2 では、メンバ数が増加するにつれてメンバのグループ離脱時に発生するグループ特定問合せに

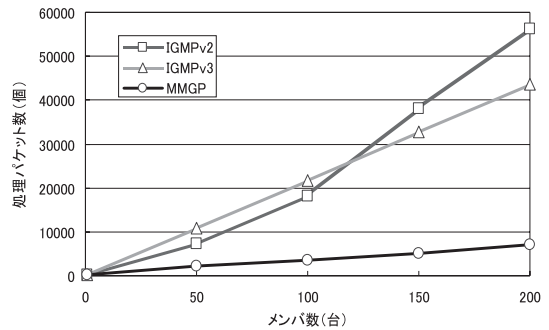


図 13 有線ネットワークにおける受信者の処理パケット数の比較
Fig. 13 Comparison of the number of processing packets over wired network.

よる受信パケット数の増加傾向が強まるからである。これに対し IGMPv3 ではグループ特定問合せが存在しないため、メンバ数増加による影響は IGMPv2 ほど大きくない。IGMP の処理パケット数に対し MMGP の処理パケット数が少ない理由は、MMGP では、トークン再割当て時以外には基本的にユニキャストを用いて通信を行うため、通信を必要とするのは通信対象となるメンバのみであることが影響している。以上のことから、MMGP により受信者の処理パケット数を減らす効果があることが分かる。

- 無線ネットワークにおける受信者の処理パケット数 (移動なし)

図 14 に、無線ネットワークにおける受信者の処理パケット数を示す。無線ネットワークにおいても、IGMPv2 と IGMPv3 の処理パケット数は多く、MMGP の処理パケット数は少ないという傾向は図 13 と同様である。IGMPv2 の処理パケット数が IGMPv3 の処理パケット数と比較して多いのは、IGMPv2 には IGMPv3 で提供されている Fast Leave 機能がないためである。Fast Leave 機能の有無が無線ネットワークにおける処理パケット数の差に大きく表れることが分かる。

- 無線ネットワークにおける受信者の処理パケット

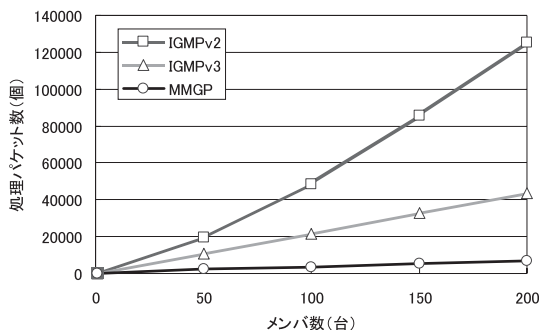


図 14 無線ネットワークにおける受信者の処理パケット数の比較 (移動なし)

Fig. 14 Comparison of the number of processing packets over wireless network (receivers do not move).

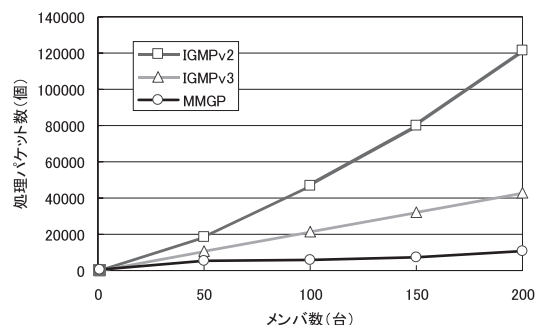


図 15 無線ネットワークにおける受信者の処理パケット数の比較 (移動あり: 平均滞在時間 10 分)

Fig. 15 Comparison of the number of processing packets over wireless network (receivers move: average stay time = 10 minutes).

数 (移動あり)

図 15 に、受信者が平均滞在時間 10 分でセルを移動する無線ネットワークにおける受信者の処理パケット数を示す。IGMP では、いずれのバージョンにおいても、受信者が移動しない図 14 と比較して、受信者の処理パケット数の変化は少ないことが分かる。これは、受信者が他のサブネットワークに移動するのと同時に、他のサブネットワークから移動する状況を考慮していることがその要因である。つまり、IGMP パケットの送受信数は受信者の移動には関係なく、単にアクセラータ配下のメンバ数に依存することが原因となっている。これに対して、MMGP では、トークンメンバが移動することにより発生するトークン再割当てに通信が必要であるため、受信者が移動しない状況と比較した場合に、処理パケット数が増加している。なお、このような状況においても IGMPv2 や IGMPv3 と比較して処理パケット数は少ないことが分かる。

図 16 に、受信者が平均滞在時間 1 分でセルを移動する無線ネットワークにおける受信者の処理パケット

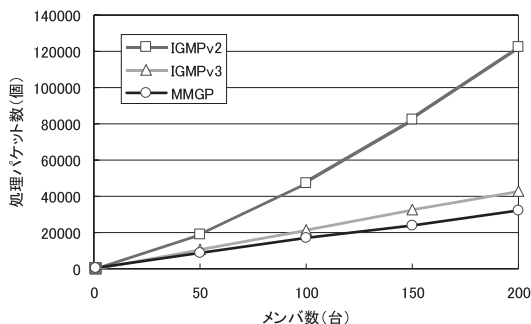


図 16 無線ネットワークにおける受信者の処理パケット数の比較 (移動あり: 平均滞在時間 1 分)

Fig. 16 Comparison of the number of processing packets over wireless network (receivers move: average stay time = 1 minute).

数を示す。IGMP では、いずれのバージョンにおいても、受信者が移動しない図 14 と比較して、処理パケット数の変化は少ないことが分かる。MMGP においては受信者の 1 つのセルへの平均滞在時間が短くなるとトークン再割当てにより処理パケット数が増加するが、受信者が頻繁に移動する状況においても IGMPv2 や IGMPv3 と比較して処理パケット数は少ないことが分かる。

5. MMGP の考察

以下では、4 章の評価結果をふまえ、MMGP に関して考察する。

- MMGP における通信シーケンス数 (トラヒック量) に関する考察

MMGP は、アクセラータ配下に最低 1 台のメンバが存在するか否かを把握するという本来のマルチキャストグループ管理の目的に沿って設計されたプロトコルであり、トークンを利用して 1 台のメンバの管理を厳密に行うことで効果的なグループ管理を実現している。そのため MMGP は、有線ネットワークにおいては IGMPv2 より通信シーケンス数が多いものの、無線ネットワークにおいては IGMP のいずれのバージョンよりも少ない通信シーケンス数でグループ管理が可能であることを示した (2.4 節の要求条件 ①)。

IGMPv2 は、LAN 等の有線のネットワークにおいては、MMGP よりも少ない通信シーケンス数でグループ管理が可能であることを確認したが、無線ネットワークにおいては、通信シーケンス数が著しく増加する傾向にあることが確認できた。これは、無線ネットワークでは、アクセラータからメンバへの下り通信のみマルチキャスト配信データがすべてのメンバにおいて受信可能であるが、あるメンバからアクセラータ

タへの上り通信ではマルチキャストデータは他のメンバで受信できないということが要因になっており、IGMPv2 を無線ネットワークに適用するには課題があることを確認した。

IGMPv3 は、有線ネットワーク、無線ネットワークのいずれに適用してもその通信シーケンス数の変化はないことを確認した。また、IGMPv3 は、MMGP と比較してすべての場合において通信シーケンス数が多いことを確認した。ただし、IGMPv3 はアクセスルータにおいてすべてのメンバを管理する機能を持っており、それについては MMGP では保持していない機能である。したがって、アクセスルータにおいてすべてのメンバの管理が必要な場合においては MMGP の代わりに IGMPv3 を適用する必要があるが、そのことによる通信シーケンス数の増加を考慮する必要がある。

- MMGP における受信者の処理パケット数（消費電力）に関する考察

MMGP では、トークンメンバの離脱を原因とするトークン再割当てに用いる MMGP Query にのみマルチキャストを用いるが、その他のすべての制御メッセージはユニキャストを用いて通信を行う。したがって、MMGP は有線ネットワーク、無線ネットワークのすべてのケースにおいて IGMP と比較して少ない処理パケット数でグループ管理の実現が可能である。つまり、MMGP は、受信者全体を考慮した際の処理パケット数の低減を図ることが可能であり、受信者が使用する端末の消費電力を低減させることが可能である（2.4 節の要求条件 ②）。

IGMPv2 と IGMPv3 のいずれも、すべての制御メッセージはマルチキャストアドレスを宛先としてやりとりされる。特に IGMP 一般問合せは、サブネットワーク中の受信者すべてがその受信対象であるために、受信者全体の処理パケット数が増加する原因となっており、受信者が使用する端末の消費電力に影響があることが課題である。特に電源容量の制限が厳しい携帯電話を受信者として用いた場合には、その待ち受け時間への影響が無視できなくなる。

- IGMP の送信抑制機能に関する考察

IGMPv2 では、IGMP 加入要求や離脱要求に対して送信抑制機能が有効に働かないという問題があった。反面、MMGP では、この機能が働かない場合が存在することを考慮し、受信者が送信する MMGP の各メッセージにはすべてユニキャストを用いることとし、通信シーケンス数の増加や処理パケット数の増加が発生しないようにしている。実際に 4 章の性能評価においても、このことを立証することができた。このこと

により、MMGP では、IGMP の送信抑制機能が働かない状況を考慮して設計されたといえる（2.4 節の要求条件 ③）。

- 受信者の移動に関する考察

MMGP では、受信者の移動によりトークンの再割当てに必要な手順を原因とする通信シーケンス数の増加が確認できた。しかし、受信者の一般的な移動速度を考慮した測定結果によると、そのような通信シーケンス数の増加傾向を考慮しても、IGMP よりも少ない通信シーケンス数でグループ管理を実現可能であることを示した（2.4 節の要求条件 ④）。

IGMP では、受信者の移動が発生した状況においてもそれが要因となって通信シーケンス数が増減する要因にはならないことが分かった。ただし IGMPv3 においては、アクセスルータにおいてすべてのメンバのグループ加入状況を管理しているため、受信者の移動によりその状態情報の不一致の要因になる。IGMPv3 では、一般問合せ（デフォルトで 125 秒間隔）により一定間隔で受信者の在籍情報を確認することによりこの状態不一致を解消することが可能であるが、受信者が頻繁に移動する環境においては、最大一般問合せの間隔時間だけ状態不一致が発生する可能性があることを考慮する必要がある。以上のことから、受信者が移動する無線ネットワークにおいては、メンバのグループ加入状況をすべて管理する IGMPv3 の設計思想は適さないため、MMGP のようにメンバすべての状態管理を行わないグループ管理方式の採用を検討する方が合理的である。

次に、MMGP の機能に着目し、各項目に分けて考察する。

- MMGP のセキュリティに関する考察

MMGP では、必要に応じてトークンメンバの加入や離脱に対して受信者認証を実行し、マルチキャスト DoS の対策が可能である（2.4 節の要求条件 ⑤）。ただし、配信データの第三者による盗聴を防止するためには、受信者認証だけでは不十分であり、マルチキャスト配信データの暗号化を組み合わせる必要がある。MMGP は、各種マルチキャスト用暗号化プロトコルと併用して利用可能であり、必要に応じてデータ暗号化プロトコルと組み合わせることができる。その一例として文献 18) で提案された AKDP (A Receiver Authentication and Group Key Delivery Protocol) との併用がその一例として考えられる。

- パケットの欠落に関する考察

無線ネットワークは有線ネットワークに比べてフェージング等の影響によりビットエラーが高くなるため、

パケットの欠落に対する対策が必要である。そこで MMGP では必要に応じて再送処理を行うことでパケットの欠落に対処する必要がある。特にトークンの送受信に関連するパケットの欠落は、MMGP ルータと受信者の状態不一致を招く可能性があるため、特に対処が必要である。そこで MMGP では、トークンの送受信については送達確認を行うように設計されており、タイマ機能と組み合わせることによって、パケットの欠落が発生した場合にはパケットの再送を行う。なお、4 章では、パケットの欠落が発生しないという前提で評価を行ったため、パケットの欠落が発生する状況における性能評価については今後の検討課題である。なお、MMGP は、IGMP と異なり送達確認を用いたメッセージの欠落への対処を行っているため、パケットの欠落が発生する状況においては MMGP がより有効である可能性がある。

● MMGP のトークン再割当ての課題

トークンメンバの離脱や移動にともなうトークン再割当ての発生は、その後のトークン再割当ての処理を必要とするため、MMGP における通信シーケンス数の増加の要因になる。したがって MMGP では、移動する確率が低いメンバや最後にグループから離脱するメンバにトークンを割り当てることにより通信シーケンス数のさらなる減少を図ることが可能となる。

たとえば、グループ在籍時間が一番長いメンバにトークンの再割当てを行うことにより、移動や圏外流出等の可能性が低いメンバにトークンを割り当てることにつながるため、結果的にトークン再割当てが発生する回数を低減させることが期待できる。以上を実現するための 1 つの実現例として、受信者のグループ在籍時間に応じて MMGP Query 受信後の MMGP Join Request の送信タイミングを変化させる方法がある。これは、メンバのグループ在籍時間が長い場合には MMGP Join Request 送信を早く行い、逆にグループ在籍時間が短い場合には MMGP Join Request 送信を遅らせ、MMGP ルータが一番早く MMGP Join Request を受信したメンバをトークンの再割当て先メンバとして選択する方法である。上記の方法以外にも、受信者の移動速度を検出して静止している受信者にトークンを割り当てる方法等、様々な工夫が考えられる。トークン再割当てに関するさらなる考察と性能評価は今後の課題として継続して検討を続ける予定である。

● トークンメンバの通信量の増加に関する考察

表 2 に示したとおり、MMGP は、トークンメンバの状態管理のための通信量が非トークンメンバと比較

して多い。表 2 によると、トークンメンバとして指定された場合には、非トークンメンバよりも 1 台あたり最大で約 9 シーケンスのシーケンス数の増加が見られた。したがって、使用するネットワークが従量制課金である場合には、受信者間で通信料金の不公平が生ずる可能性がある。

ただし、実際にトークンメンバとなるのは 1 つのサブネットワークで同時に 1 台のみである。このことから、トークンメンバとなる確率も考慮すると、トークンメンバとなることにより増加する通信オーバーヘッドの増加の影響そのものが小さいと考えられる。たとえば表 2 の受信者が静止している状況での測定結果によると、200 台の受信者のうち 7 台がトークンメンバとなり、1 台あたり平均 9 シーケンスのシーケンス数の増加が見られた。ここで、200 台のメンバ 1 台あたりのシーケンス数の増加を算出すると、1 台あたり 1 シーケンスを下回る。以上のことから、トークンメンバになることによる通信量の一時的な増加は無視できないが、トークンメンバになる確率も含めて考慮するとその影響は小さいことが分かる。

● トークンメンバと非トークンメンバの公平性

前述のようにトークンメンバになることで通信量の増加が発生するため、特定の受信者に対するトークン割当てが集中しないようにする仕組みが必要である。MMGP は元々ランダムに受信者に対してトークンを割り当てるため、トークンが特定の受信者に集中しないように設計されている。しかし、トークンを受信者で公平に割り当てるための仕組みをさらに用意することによってメンバ間の公平性の効果をより高められる。

たとえば、受信者における過去のトークン受領回数に応じて MMGP Query 受信後の MMGP Join Request の送信タイミングを変化させる方法が考えられる。これは、受信者における過去のトークン受領回数が少ない場合には MMGP Join Request 送信を早く行い、逆に受領回数が多い場合は MMGP Join Request 送信を遅らせ、MMGP ルータが一番早く MMGP Join Request を受信したメンバをトークンの再割当て先メンバとして選択する方法である。この方法によれば、トークンをさらにランダムに割り当てる効果が期待できる。

また、トークンメンバと非トークンメンバの通信量の差異の問題は、携帯電話における通信料金定額制等の制度面の整備により通信料金の面での不公平が改善されることも期待できる。

● トークン数の複数化に関する考察

MMGP は、トークンを利用して 1 台のメンバの管

理を厳密に行うことで効果的なグループ管理を実現している。しかし、トークンを複数個用意し、複数のメンバに与える方法も考えられる。与えるトークンの数については MMGP ルータ配下のメンバ数や、受信者の移動が頻繁か否かに応じて MMGP ルータにおいて決定する案が考えられる。なお、与えるトークン数を無限大にすると、他の機能を変更することなく MMGP ルータはすべてのメンバを管理することが可能となり、結果として IGMPv3 と同等の効果も得られる。最適なトークン数の決定方法の検討や、トークン数を変動させた場合の評価については今後の課題である。

● MMGP と IGMP の混在環境に関する考察

MMGP の導入を進めるにあたり、MMGP をサポートしないルータや受信者の混在環境を考慮する必要がある。たとえば、MMGP 非対応ルータと MMGP 対応受信者が通信を行う場合には、MMGP 対応受信者からの MMGP Join Request は単に無視されることになる。この場合 MMGP 対応受信者は、MMGP による通信を数回試みた後、タイムアウトを待って IGMP による通信に切り替えて再度通信を実行することでマルチキャストデータの受信が可能である。また、MMGP 対応ルータと MMGP 非対応受信者が通信を行う場合も存在するため、MMGP 対応ルータは IGMP による通信にも対応する必要がある。以上のように、MMGP が十分に普及するまでは、ルータや受信者は IGMP についても対応し、通信相手がサポートする方式にあわせて利用する方式を切り替えて実行することで両者の混在環境への対応が可能である。

6. ま と め

本論文では、既存のグループ管理プロトコルを移動通信網や無線 LAN 等の無線ネットワークに適用した場合、通信コストが高くなるほか、電源断や移動により受信者との接続が突然途絶えた場合の対策が行われていない問題を指摘し、これを解決するため、モバイルマルチキャスト向けのグループ管理プロトコル MMGP を提案した。そして、シミュレーション実験により MMGP と IGMP の比較を行い、MMGP の性能とその特徴を明らかにした。性能評価や考察の結果得られた結論は以下のとおりである。

- MMGP は、有線 LAN で構成されるネットワークや移動通信網、無線 LAN で構成されるネットワークにおいて利用可能である。特に無線を利用したネットワークにおいては、IGMP と比較して少ない通信シーケンス数でグループ管理の実現が可能である。

- MMGP は、無線を利用したネットワークにおいて受信者が移動する環境を考慮した場合において、IGMP と比較して少ない通信シーケンス数でグループ管理の実現が可能であり、IGMP と比較して通信コストを低く抑えることが可能である。
- MMGP は、受信者において、IGMP と比較して少ない処理バケット数でグループ管理が可能であるため、より少ない消費電力でグループ管理が可能である。特に携帯電話等、電源容量の制約が大きい端末を受信者として用いる場合には MMGP は有効である。
- MMGP は、グループ管理のみでなく、マルチキャスト DoS への対策が可能である。また、他のマルチキャスト用暗号化プロトコルと MMGP の併用によりデータの暗号化等さらなる機能追加も可能である等、拡張性を持つ。

なお、これまでにマルチキャストグループ管理プロトコルのモバイル環境への適用について十分に検討が行われた研究例は少なく、本研究の新規性は高いと考えられる。したがって本研究は、今後のモバイルマルチキャスト向けグループ管理プロトコルの研究、標準化において、先駆的な研究事例として活用されることが期待できるため、有用性が高いと考える。

今後は、MMGP の残存課題としてあげたトークンメンバと非トークンメンバの公平性やトークンを複数個用いた場合の影響、本方式のスケーラビリティに関する検討を継続する予定である。また、本研究では、ネットワークシミュレーションによって MMGP の比較検討を行うにとどまった。今後は、MMGP を実装することにより、実装システム上での課題を整理する等、実用化に向けた取り組みも行う予定である。その後、MMGP の国際標準化を実現することによって MMGP が実装された製品の普及促進を図ることが実用化に向けた課題である。

参 考 文 献

- 1) Deering, S.: Multicast Routing in a Datagram Internetwork, Ph.D. thesis, Stanford University (1991).
- 2) Deering, S.: Host Extensions for IP Multicasting, RFC 1112 (1989).
- 3) Inamura, H., Montenegro, G., Ludwig, R., Gurtov, A. and Khafizov, F.: TCP over Second (2.5G) and Third (3G) Generation Wireless Networks, RFC 3481 (2003).
- 4) 3rd Generation Partnership Project: Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS);

- Architecture and Functional Description, 3GPP TS 23.246 (2004).
- 5) 隅岡敦史, 古村隆明, 藤川賢治, 上野英俊, 高木治夫: IP マルチキャスト/無線 LAN を用いた球場内マルチカメラ放送: 電子情報通信学会研究報告, Vol.104, No.689, pp.95-100 (2005).
 - 6) Fenner, W.: Internet Group Management Protocol, Version 2, RFC 2236 (1997).
 - 7) Cain, B., Deering, S., Kouvelas, I., Fenner, B. and Thyagarajan, A.: Internet Group Management Protocol, Version 3, RFC 3376 (2002).
 - 8) 上野英俊, 鈴木偉元, 三浦史光, 石川憲洋: マルチキャストにおける DoS アタック対策に関する考察, 第 2 回情報科学技術フォーラム (2003).
 - 9) Romdhani, I., Kellil, M. and Lach, H.: IP Mobile Multicast: Challenges and Solutions, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol.6, No.1 (2004).
 - 10) Varshney, U.: Multicast over Wireless Networks, *Comm. ACM*, Vol.45, No.12, pp.31-37 (2002).
 - 11) Harrison, T., Williamson, C., Mackrell, W. and Bunt, R.: Mobile Multicast (MoM) Protocol: Multicast Support for Mobile Hosts, *ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, pp.151-160 (1997).
 - 12) Chikarmane, V., Williamson, C., Bunt, R. and Mackrell, W.: Multicast Support for Mobile Hosts Using Mobile IP: Design Issues and Proposed Architecture, *ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications*, Vol.3, No.4, pp.365-379 (1999).
 - 13) Moritani, Y. and Atsumi, Y.: Seamless Hand-off Method for Multicast Receivers Based on Wireless Link Connection Intensity, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (2003).
 - 14) Kaur, S., Madan, B. and Ganesan, S.: Multicast Support for Mobile IP Using a Modified IGMP, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (1999).
 - 15) Xylomenos, G. and Polyzos, G.: IP Multicast Group Management for Point-to-Point Local Distribution, *Computer Communications*, Vol.21, No.18, pp.1645-1654 (1998).
 - 16) Ritter, M.: The future of WLAN, *ACM Queue*, Vol.1, No.3 (2003).
 - 17) UCB/LBNL/ISI/VINT: The Network Simulator — ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
 - 18) Ueno, H., Suzuki, H., Ishikawa, N. and Takahashi, O.: A Receiver Authentication and Group Key Delivery Protocol for Secure Multicast, *IEICE Trans. Communications*,

Vol.E88-B, No.3, pp.1139-1148 (2005).

(平成 18 年 6 月 28 日受付)

(平成 19 年 1 月 9 日採録)

推薦文

本論文は、モバイルネットワークに適した新たなマルチキャストグループ管理プロトコルを提案している。まず、モバイルネットワーク上でのグループ管理プロトコルの要求要件を明確化し、これを満たすプロトコル MMGP を設計している。MMGP は、アクセスルータ配下のマルチキャストグループメンバにトークンを割り当て、トークンを割り当てた端末のみを管理することで、グループ管理メッセージ数を削減する。また、標準的なプロトコルである IGMP と MMGP を定量的に比較し、MMGP の優位性を示している。提案方式は、今後のモバイルネットワークにおける多数ユーザに対する同種データの配信に有効な通信方式として高く評価できる。

(モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会主査 渡辺 尚)



上野 英俊 (正会員)

昭和 49 年生。平成 9 年筑波大学第三学群情報学類卒業。平成 11 年同大学大学院工学研究科電子・情報工学専攻修士号取得退学。同年株式会社 NTT ドコモ入社。現在、株式会社 NTT ドコモサービス&ソリューション開発部に所属。博士(工学)。携帯電話向けサービスの導入戦略策定とモバイルインターネットの研究開発に従事。電子情報通信学会会員。



鈴木 偉元

昭和 41 年生。平成元年千葉大学工学部機械工学第二学科卒業。平成 3 年同大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。現在、株式会社 NTT ドコモサービス&ソリューション開発部に所属。博士(情報学)。モバイルインターネットの研究開発に従事。電子情報通信学会会員。



石川 憲洋 (正会員)

昭和 53 年京都大学工学部情報工学科卒業。昭和 55 年同大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社(現日本電信電話株式会社)入社。現在、株式会社 NTT ドコモサービス&ソリューション開発部に所属。博士(情報学)。モバイルインターネットの研究開発に従事。電子情報通信学会会員。



木村 成伴 (正会員)

昭和 42 年生。平成 7 年東北大学大学院情報科学研究科情報基礎科学専攻博士課程後期 3 年の課程修了。同年筑波大学電子・情報工学系講師。平成 12 年同助教授。平成 16 年同大学大学院システム情報工学研究科助教授。現在に至る。博士(情報科学)。プロセス代数, ネットワークプロトコル, 通信システムの効率評価等に関する研究に従事。電子情報通信学会, ソフトウェア科学会, IEEE, ACM 各会員。



海老原義彦 (正会員)

昭和 22 年生。昭和 50 年東北大学大学院博士課程電子及通信工学専攻単位取得退学。同年同大学助手。昭和 50 年筑波大学電子・情報工学系助手, 昭和 51 年同講師, 昭和 60 年同助教授, 平成 5 年同教授。平成 10 年から 11 年まで同大学学術情報処理センター長, 平成 12 年から 14 年まで同大学電子・情報工学系長。平成 16 年同大学大学院システム情報工学研究科教授。平成 17 年から 18 年まで同大学第三学群長。現在に至る。工学博士。コンピュータネットワークアーキテクチャ, デジタル通信システムの性能評価, および知的通信システムの研究等に従事。電子情報通信学会会員。