

ヘテロジニアスな通信環境下におけるグループ型通信のためのネットワークポロジ動的構成方式

田坂 和之^{†1} 今井 尚樹^{†1}
磯村 学^{†1} 堀内 浩規^{†1}

携帯電話や PC を用いた様々な形態のグループ型通信が普及し始めている。グループ型通信は、1 対 1 の通信と比較して各端末間のトラフィックが増加する傾向にある。これがサービスに影響を及ぼさないよう、端末間のネットワークポロジは、サービスの実行環境に依存したものとなる。一方で、移動網と固定網の融合が急速に進んでおり、今後は、通信端末、アプリケーション、アクセスネットワークなどの通信リソースが多様化するヘテロジニアスな通信環境に対応する必要がある。さらに、通信リソースを適切に切替え可能とすることも重要となる。しかしながら、既存のグループ型通信のネットワークポロジでは、スケーラビリティや多種多様な端末の収容が困難などの問題がある。さらに、通信リソースの切替えによる通信端末や通信状況の変化にも対応困難な問題がある。そこで本論文では、ヘテロジニアスな通信環境に適したセンタサーバ型とフルメッシュ型の複合型となるハイブリッド型のネットワークポロジを示す。さらに、通信リソースの切替えにより変化する通信端末や通信状況に応じてネットワークポロジを動的に構成する、ネットワークポロジ動的構成方式を提案する。そして、これらの方式に基づいたプロトタイプシステムを実装し、サーバや通信端末のデータ到達遅延、到達率ならびにネットワークポロジの切替え時間の観点から性能を評価することで、本方式の有効性を示す。

Dynamic Network Topology Configuration System for Group Communication in Heterogeneous Networking Environment

KAZUYUKI TASAKA,^{†1} NAOKI IMAI,^{†1} MANABU ISOMURA^{†1}
and HIROKI HORIUCHI^{†1}

Real-time group communication services using cellular phones and PCs begin to be provided to users. The group communication tends to increase traffic between each terminal compared to one-to-one communication. Therefore, existing network topologies are depends on execution environments of services. On the other hand, convergence of fixed and mobile networks is rapidly advanced. In the future, it is necessary to apply the group communication to heterogeneous networking environment that communication resources such as terminals, applications and access networks are diversified. Moreover, it is also important to adapt the case of switching the communication resources dynamically. However, existing network topologies have some issues such as scalability, adaptability of various different types of terminals and disconnection of group communication services. In this paper, we present a novel network topology for heterogeneous networking environment and propose a system that configures the network topology dynamically according to the kind of the terminals and the communication status. We implemented the proposed system and evaluated the system performance through network delay between the terminals and the network topology switching time. The results show that the system is practically effective on these metrics.

1. ま え が き

第 3 世代携帯電話を用いた PoC (Push-to-talk over Cellular) サービスでは、半二重の音声通話、チャット

ト、写真交換などのグループ型通信機能が提供されている¹⁾。また、ブロードバンド回線で接続された PC や専用端末による電話・テレビ会議サービスでは、グループメンバによる臨場感あふれるコミュニケーションが可能である。このように、移動および固定通信環境に対応した様々なグループ型通信サービスが普及し始めている。

^{†1} 株式会社 KDDI 研究所
KDDI R&D Laboratories Inc.

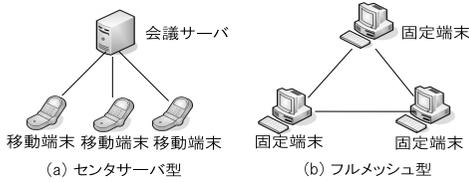


図 1 既存のネットワークポロジ

Fig. 1 Existing network topologies.

グループ型通信では映像や音声などのメディアを送受する端末数が増加するため、1対1の通信と比較してトラフィックが増加する傾向にある。これがサービス品質に影響を及ぼさないよう、グループを構成する端末間のネットワークポロジは、端末の性能やアクセスネットワークの特徴など、サービスの実行環境に特化したものとなる。

たとえば、携帯電話（移動端末）によるPoCサービスでは、端末の処理負荷とアクセスネットワークのトラフィックを軽減するため、会議サーバを用いたセンタサーバ型（図1(a)）のネットワークポロジが利用される。一方、固定網に接続されたPC（固定端末）によるテレビ会議サービスでは、フルメッシュ型のネットワークポロジ（図1(b)）を利用することで、メディアの到達遅延やサーバの設置・管理コストを削減することができる。今日のグループ型通信サービスにおけるネットワークポロジの形態は、センタサーバ型とフルメッシュ型の2種類に分類される。

一方で、ITU-TにおけるNGN（Next Generation Network）の標準化をはじめ、移動網と固定網の融合（FMC：Fixed Mobile Convergence）が急速に進んでいる。FMCは通信端末、アプリケーション、アクセスネットワークなどの通信リソースの多様化を特徴とするが、ユーザの通信環境にかかわらず、つねにサービスが提供されなければならない。さらに、ユーザの周辺状況は時々刻々と変化するため、通信リソースを切り替えながらサービスを継続するといったFMCならではのモビリティサポート²⁾をグループ型通信に適用可能とすることも重要となる。

通信リソースの多様化を考慮して、グループ型通信サービスのネットワークポロジに着目すると、センタサーバ型とフルメッシュ型では、性能差がある端末、利用可能なアプリケーションに差がある端末、速度差があるアクセスネットワークを収容することは困難である（問題1）。具体的にセンタサーバ型の場合、通信リソースの多様化は、多様な端末からの莫大なアクセス集中を引き起こすため、スケーラビリティの問題が発生する。一方、フルメッシュ型はブロードバ

ンド回線に接続された高性能な端末を想定しているため、携帯電話などの端末を収容することは難しい。

また、サービス実行中には、無線状態の変化、ユーザの参加や離脱、ユーザによる通信リソースの切替えなどにより、グループ型通信の実行環境がしばしば変化する。その結果、構成中のネットワークポロジが最適でなくなるだけでなく、サービスの切断を引き起こす場合も出てくる（問題2）。

そこで本論文では、（問題1）を解決するため、センタサーバ型とフルメッシュ型の複合型となるハイブリッド型のネットワークポロジを示す。ハイブリッド型は、代表端末の導入による既存のネットワークポロジの融合を特徴とし、多様化する通信リソースを収容可能とする。さらに、（問題2）を解決するため、グループ型通信の実行環境に応じて、サービスを切断せずにネットワークポロジを変更可能とする、ネットワークポロジ動的構成方式を示す。そして、これらの方式に基づいたプロトタイプシステムを実装し、サーバや端末のメディアの到達遅延、到達率ならびにネットワークポロジの切替え時間などの観点から性能を評価することで、本方式の有効性を示す。

以下、2章ではヘテロジニアスな通信環境下でのグループ型通信実現のための問題点について述べる。3章では既存の問題を解消するハイブリッド型のネットワークポロジを示し、ネットワークポロジ動的構成方式を提案する。4章では提案方式の実装を述べ、5章では提案方式の性能を評価する。6章では関連研究について述べ、最後に7章で本論文をまとめる。

2. ヘテロジニアスな通信環境がもたらすグループ型通信の問題

2.1 端末間のネットワークポロジ

ヘテロジニアスな通信環境における既存のネットワークポロジの問題点を以下に述べる。

センタサーバ型は、会議サーバが各通信端末からメディアを受信し、メディアのコーデック変換処理や音声のミキシングなどのメディア集約処理を行う。次いで、処理したメディアを各通信端末に配信することで、通信端末における処理負荷やネットワークのトラフィックの軽減が可能である。たとえばH.320やH.323あるいはSIP（Session Initiation Protocol）³⁾に準拠したテレビ会議システムは、MCU（Multipoint Control Unit）を用いたセンタサーバ型のトポロジを構成する。しかしながらセンタサーバ型は、通信端末数の増加によって会議サーバへのアクセス集中も増加するスケーラビリティの問題や、会議サーバのダウンによっ

てサービスが切断してしまう SPoF (Single Point of Failure) などの問題がある。

さらに、ヘテロジニアスな通信環境においてセンタサーバ型を利用するためには、同一種類の端末を収容する場合に比べ、より多種類のコーデックに対する変換処理やメディア集約処理が必要になる。したがって、会議サーバのスケラビリティに対する要求がより厳しくなるという問題が発生する。

一方、フルメッシュ型は、処理性能が高く、高帯域なアクセスネットワークに接続する通信端末（以下、高機能端末とよぶ）が、他の通信端末とメディアを直接送受信することで、低遅延の通信を可能とする。たとえば Eyeball Messenger SDK⁴⁾ を利用した音声会議システムは、フルメッシュ型のトポロジを構成する。さらに、フルメッシュ型は、センタサーバ型のように会議サーバが存在しないため、会議サーバのスケラビリティや SPoF の問題が発生しない。

ヘテロジニアスな通信環境では、携帯電話のように処理能力が低く、狭帯域のアクセスネットワークから接続される通信端末（以下、低機能端末とよぶ）もグループに参加できなければならない。しかしながら、上記特徴を持つ低機能端末は、グループを構成する他の通信端末とメディアを直接送受信することが困難であるため、フルメッシュ型に適さない。

2.2 サービス実行環境の変化

2.2.1 参加者による通信リソース切替え

ユーザの状況や希望にあわせて、通信端末間のセッションを統合的に制御することで、通信リソースを動的に切り替える通信リソース切替え方式が提案されている²⁾。なお、ここでのセッションとは、1つのメディアの送信側から受信側への流れを意味する。通信リソース切替え方式により、混雑した公共車両内で音声通話からチャットに切り替えたり（アプリケーション切替え）、オフィスでのテレビ電話会議中に固定端末から移動端末へと切り替えて移動したり（端末切替え）、移動する際にアクセスネットワークを切り替えたり（アクセスネットワーク切替え）することができる。

本方式をはじめとする既存の通信リソース切替え方式は、1対1の通信を対象としているため、切替え要求元の通信端末（以下、要求元端末とよぶ）と要求先の通信端末（以下、要求先端末とよぶ）間のセッション制御のみを行う。しかしながら、グループ型通信では、要求先端末は複数存在し、それらの間のセッションは制御されないという問題がある。たとえば、あるグループが音声会議を行っている状態で、ある端末が

テレビ会議へのアプリケーション切替えを要求する。この場合、要求元端末と要求先端末の間におけるアプリケーションはテレビ会議に切り替わるが、要求先端末どうしのセッションは変更されないため、アプリケーションは音声会議のままとなる。

2.2.2 適切なトポロジの変化

無線状態の変化、グループを構成するユーザの参加や離脱、さらに通信リソースの切替えなどにより、グループを構成する通信端末の種類や通信環境が変化する。しかしながら、現状のサービスでは、グループ型通信の実行環境が変化すると、ネットワークトポロジが最適でなくなるだけでなく、サービスの切断を引き起こす場合も出てくる。たとえば、センタサーバ型において、すべての移動端末が離脱し、固定端末のみのグループ型通信に変化した場合、2.1節で述べたとおり、フルメッシュ型がより適しているにもかかわらず、会議サーバ経由での通信が継続されてしまう。また、フルメッシュ型の通信に低機能端末が参加した場合、フルメッシュ型のネットワークトポロジを維持することは困難である。

3. ヘテロジニアスな通信環境下でのグループ型通信制御方式の提案

3.1 機能要件

本節では、ヘテロジニアスな通信環境でのリアルタイムなグループ型通信を実現するため、2章で述べた問題を解決する以下の2つの機能要件を述べる。

機能要件 1:

2.1節の問題を解決するため、異種通信端末の収容ならびに会議サーバのスケラビリティや SPoF の問題を解消する、新たなネットワークトポロジを構成する機能が必要である。

機能要件 2:

2.2節の問題を解決するため、既存の通信リソース切替え方式をグループ型通信に対応させる (i)。さらに、通信リソース切替え方式などによりグループ型通信の実行環境が変化した場合においても、グループ型通信を維持しつつ、かつ通信端末ならびに会議サーバの処理負荷の観点から最適なネットワークトポロジを動的に構成する機能が必要である (ii)。

3.2 基本機能

2つの機能要件を満たす基本機能を以下に述べる。

(1) ハイブリッド型ネットワークトポロジ構成機能

本機能は機能要件 1 を満たすために、センタサーバ型の利点である異種通信端末の収容ならびにフルメッシュ型の利点であるスケラビリティや耐障害性を両

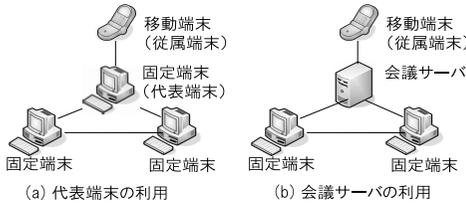


図 2 ハイブリッド型のネットワークポロジ
Fig. 2 The hybrid network topology.

立させたハイブリッド型のネットワークポロジを構成する機能である。

会議サーバへのアクセス集中を回避するためには、アクセス分散や機能分散可能なフルメッシュ型のネットワークポロジを構成することが望ましい。しかしながら、複数の通信端末とメディアを直接送受信することの困難な低機能端末が存在する。そこで、会議サーバの代理として動作可能なユーザの高機能端末を代表端末として利用する。代表端末は、会議サーバが持つコーデック変換機能やメディア集約機能を備え、会議サーバの代わりに低機能端末を収容することで、会議サーバへのアクセス集中を分散する。本論文では、代表端末に収容された低機能端末を従属端末とよび、このようなネットワークポロジ（図 2(a)）を、ハイブリッド型のネットワークポロジとよぶ。

代表端末は、自端末が送受信するメディアに加えて、従属端末が送受信するメディアを集約する必要があるため、他の通信端末と比較してアクセスが集中する。このため、高機能端末どうしの通信においては、メディアを直接送受信ならびに処理する。また、各代表端末のデータ到達遅延や負荷に応じて、収容する従属端末の割当てを調整するとともに、代表端末だけではすべての従属端末を収容できない場合には、図 2(b) のように、会議サーバを利用することも可能とする。

(2) グループ型通信対応通信リソース切替え機能

本機能は、機能要件 2(i) を満たすために、既存のグループ型通信切替え方式を拡張し、グループ型通信に対応させた機能である。

既存の通信リソース切替え方式では、要求先端末が 1 つのみであったが、グループ型通信では、グループに参加する全通信端末が対象となる。そこで要求元端末は、グループに参加するすべての要求先端末へ切替え要求を送信する。さらに、切り替える通信リソースがアプリケーションであった場合、要求元端末と要求先端末間のアプリケーションだけでなく、要求先端末どうしにおいても同じアプリケーションに変更する必要がある。そこで、セッションを管理するサーバは、

表 1 各ネットワークポロジの特徴
Table 1 Characteristics of network topologies.

	CN	FM	HB
サーバ負荷	高	不要	中
高機能端末負荷	低	高	中
低機能端末負荷	低	-	低
対応端末	両方	高機能	両方

CN: センタサーバ型 FM: フルメッシュ型
HB: ハイブリッド型

要求元端末からアプリケーション切替え要求を受信すると、要求先端末に対して要求元端末とのアプリケーションの切替えを要求するとともに、要求先端末間でも同じアプリケーションへの切替えを要求する。

なお、端末切替えやアクセスネットワーク切替えの場合、要求先端末は要求元端末に対する既存のセッションの宛先を、要求されたアドレスに切り替えるだけであるため、要求先端末間のセッション制御は必要ない。

(3) ネットワークポロジ動的構成機能

本機能は、機能要件 2(ii) を満たすため、グループ型通信の実行環境の変化に応じて、通信端末ならびに会議サーバ間のデータ到達遅延や負荷の観点から最適なネットワークポロジを動的に構成する機能である。

表 1 に、ハイブリッド型を含む各ネットワークポロジにおける特徴をまとめる。センタサーバ型のネットワークポロジ（表 1 (CN)）は、会議サーバへのアクセス負荷は高いが、各通信端末の負荷を低く抑えることができるため、グループ内に代表端末となりうる通信端末が存在しない場合にも適用できる。フルメッシュ型のネットワークポロジ（表 1 (FM)）は、会議サーバを必要としない一方で、直接メディアを送受信可能な高機能端末で構成されるグループにのみ適用できる。また、端末間でメディアを直接送受することから、端末のアクセス負荷も高くなる。ハイブリッド型のネットワークポロジ（表 1 (HB)）は、従属端末である低機能端末が代表端末に収容されるため、センタサーバ型と同じくアクセス負荷は低い。代表端末以外の高機能端末は、通信状況に応じて代表端末や会議サーバに収容されることも可能であるため、負荷はフルメッシュ型よりも低く、かつ会議サーバへの負荷集中を抑制できる。このように通信端末の構成によって、構成可能かつ最適なネットワークポロジは異なる。

本機能は、通信端末の CPU 性能、メモリ容量やネットワーク帯域などの処理性能情報を受信（図 3(1)）後、代表端末（候補）や従属端末を決定し（図 3(2)）、ネットワークポロジを決定・構成する（図 3(3)）。グループ型通信中は、CPU・メモリ使用率ならびにデータ到達遅延などの通信環境情報を受信し（図 3(4)）、代表

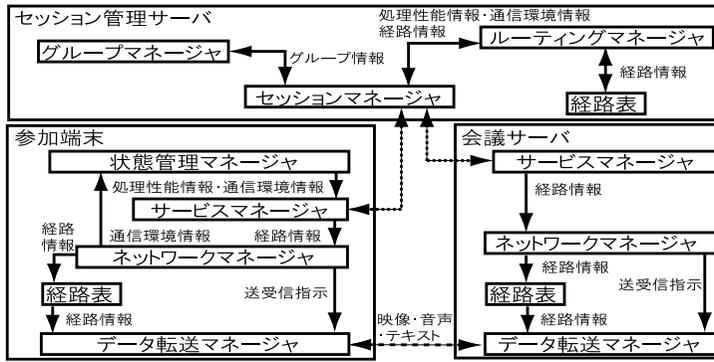


図 4 システム構成図
Fig. 4 System architecture.

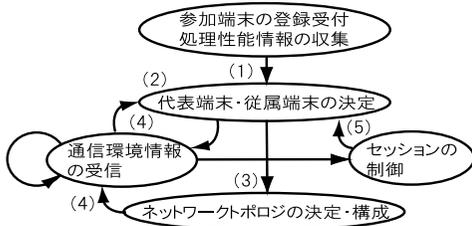


図 3 セッションを管理するサーバの状態遷移図
Fig. 3 State transaction diagram in session control server.

端末や従属端末を再決定する (図 3(2)). また、通信リソース切替え発生時のセッション制御後 (図 3(5)) は、参加端末の種類や通信環境が変化するため、代表端末・従属端末を再決定する。代表端末・従属端末の決定後、その数に応じて最適なネットワークポロジを動的に決定・構成する (図 3(3)). 具体的には、代表端末は收容する従属端末ならびに従属端末でない通信端末と、従属端末は代表端末と、それ以外の通信端末は従属端末以外の通信端末とセッションを確立することでネットワークポロジを構成する。

3.3 システムアーキテクチャ

3.2 節で述べた基本機能を備えたシステム構成図を 図 4 に示す。以下にその詳細を述べる。

参加端末

参加端末はグループに参加し、テレビ会議や音声会議などのアプリケーションを実行する。参加端末は、サービスマネージャ、状態管理マネージャ、ネットワークマネージャ、データ転送マネージャ、経路表という構成要素を持つ。

参加端末を所有するユーザは、グループ型通信を行うため、サービスマネージャ経由で会議の開始、参加・離脱、自端末の登録、参加端末の招待などをセッション管理サーバへ要求する。ユーザがサービス切替を

希望する場合は、サービスマネージャを経由して、セッション管理サーバへ切替え要求を送信する。

また、サービスマネージャは、自端末の登録時に処理性能情報を、グループ通信中には通信環境情報をセッション管理サーバに通知する。なお、状態管理マネージャが、処理性能情報ならびに通信環境情報のパラメータである CPU・メモリ使用率を測定する。また、ネットワークマネージャがデータ到達遅延・到達率を測定する。サービスマネージャは、セッション管理サーバから経路情報を受信すると、メディアの送受信先を切り替える。ここでの経路情報は、通信端末のアドレス (SIP URI や IP アドレス) とその宛先端末のアドレスを示す。データ転送マネージャは、メディアを送受信する。なお、自端末が代表端末である場合は、従属端末のメディアを送受信するため、コーデック変換、メディアの集約処理も行う。

会議サーバ

会議サーバは、フルメッシュ型で代表端末が存在しない場合やセンタサーバ型の場合に、従属端末を收容する。この会議サーバは、サービスマネージャ、ネットワークマネージャ、データ転送マネージャ、経路表を構成要素に持つ。各モジュールは、参加端末が持つモジュールと同じ機能を持つ。

セッション管理サーバ

セッション管理サーバはセッション情報を管理し、通信リソース切替えやネットワークポロジの動的構成のため、各端末のセッションを制御するサーバである。また、通信端末の処理性能情報や通信環境情報を受信し、代表端末と従属端末の決定を行う。

セッション管理サーバは、セッションマネージャ、グループマネージャ、ルーティングマネージャ、経路表を構成要素に持つ。セッションマネージャは、各参加端末や会議サーバのセッション情報を管理する。グルー

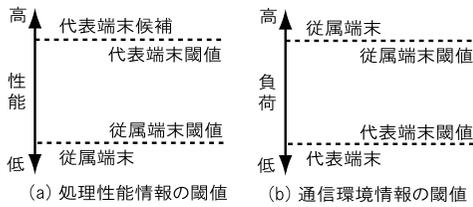


図 5 代表端末閾値ならびに従属端末閾値

Fig. 5 Threshold of super nodes and slave nodes.

ブマネージャは、各会議の名前やその参加者などのグループ情報を管理する。ルーティングマネージャは、処理性能情報や通信環境情報を管理し、代表端末や従属端末を決定する。さらに、その結果に応じてネットワークポロジを決定し、経路情報を生成する。その後、セッションマネージャは各通信端末や会議サーバへ生成した経路情報を送信する。

3.4 代表端末と従属端末の決定

代表端末と従属端末の決定プロセスを以下に述べる。

(1) 処理性能情報による代表端末（候補）と従属端末の決定

セッション管理サーバは、参加端末の登録要求を受付後、参加端末から受信した処理性能情報を用いて端末種別を決定する（図 3 (1)）。端末種別の候補を決定するため、代表端末閾値と従属端末閾値の 2 つの閾値を導入する。図 5 (a) に示すとおり、代表端末閾値は従属端末閾値より大きな値とする。セッション管理サーバは端末の処理性能情報を各閾値と比較し、代表端末閾値以上であれば代表端末候補、従属端末閾値以下であれば従属端末とする。

通信環境情報を受信していない初期状態で、従属端末が存在する場合、最も処理性能の高い代表端末候補が、代表端末として従属端末を収容し（図 3 (2)）、ネットワークポロジを構成・決定する（図 3 (3)）。

(2) 通信環境情報の通知

参加端末は、自端末の通信環境情報をセッション管理サーバへ定期的に通知する。この通信環境情報の値は、アプリケーションの起動時など、各端末の利用状況によって、ゆらぐことがある。参加端末が、ゆらぎ発生時の通信環境情報を通知すると、頻繁なトポジ変化によるパケット断時間を発生させることになる。したがって、頻繁なトポジ変化を抑制するため、参加端末が通知する通信環境情報の値は、一定期間に取得した通信環境情報の平均値とする。なお、セッションの変更後、参加端末はこの平均値を初期化する。

(3) 通信環境情報による代表端末と従属端末の決定
セッション管理サーバは、参加端末からの通信環境

情報を用いて、代表端末と従属端末を決定する。ただし、セッション管理サーバは、ガードタイムを設け、通信環境情報の状態が変化しても、一定時間、その状態が継続するまでは、その値を使用しない。以下に代表端末と従属端末の決定方法を示す。

図 5 (b) に示すとおり、従属端末閾値以上の参加端末を従属端末とする（図 3 (2)）。なお、ここで使用する代表端末閾値は従属端末閾値より小さな値とする。ただし、これらの閾値は、図 5 (a) に示した閾値とは別の値を持つ。また、セッション管理サーバは、従属端末を決定すると、従属端末を収容させる代表端末を決定する。具体的には、図 5 (b) における代表端末閾値以下の低負荷状態にある代表端末候補の中から処理負荷の低い順に従属端末を収容させる代表端末を割り当てる。

(4) 複数の代表端末による経路変更（図 3 (2)）

テレビ会議などのリアルタイム通信では、会話のリアルタイム性が重要となる。したがって、本機能では、従属端末を収容する代表端末を処理負荷の低い順に割り当てる一方で、データ到達遅延を考慮した代表端末の割当ての変更も行う。

たとえば、ある代表端末に接続している従属端末が、ユーザの周辺状況の変化（物理的な移動）などにより、接続するネットワークが変化した場合、別の代表端末や代表端末を経由してメディアを送信した方が、端末間のデータ到達遅延の平均値を抑えることができる状況がある。このような場合、セッション管理サーバは、参加端末の状態が変化した時点で、受信した通信環境情報のデータ到達遅延を基に、各端末間のデータ到達遅延の平均が最小となるように、ネットワークポロジを計算し、構成する。

3.5 グループ型通信対応通信リソース切替えのためのセッション制御

本方式では、セッション制御用のプロトコルとして、SIP を使用する。

SIP を用いた通信リソース切替え時（図 3 (5)）のシーケンスを図 6 に示す。ここでは、 n 台の固定端末 (FN1, FN2, ..., FN n) でテレビ会議を実施している。ここで、通信端末を FN1 から移動端末 (MN1) へ、アプリケーションをテレビ会議から音声会議に切り替える。

FN1 は、SIP の REFER メソッドを使用して、セッション管理サーバに通信リソース切替えを要求する（図 6 (1)–(2)）。端末切替えの要求は、要求メッセージのヘッダ部に切替え先の端末の SIP URI を記述し、アプリケーションあるいはアクセスネットワーク切替え

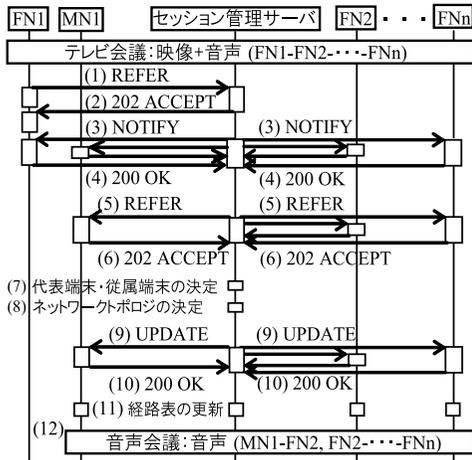


図 6 リソース切替えのシーケンス図
Fig. 6 Sequence in resource switching.

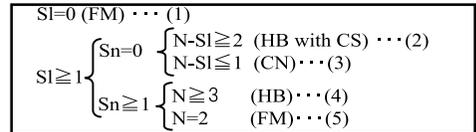
の場合は、ボディ部に切替え後のアプリケーションあるいはアクセスネットワークの情報を SDP (Session Description Protocol) として入力する。ここでアプリケーションの情報とは、アプリケーション名とアプリケーションで使用するメディアの種類を示す。また、アクセスネットワークの情報とは、切替え先のアクセスネットワークで使用する IP アドレスならびにポート番号を示す。

セッション管理サーバは、要求元端末から通信リソース切替え要求を受信すると、NOTIFY メソッドを使用して、すべての要求先端末に通信リソース切替えの可否を確認する (図 6 (3))。全端末が切替え可能な場合 (図 6 (4))、セッション管理サーバは、切替え前後のアプリケーションを比較することで、未確立のセッションならびに不要なセッションを特定する。

未確立のセッションあるいは不要なセッションが存在する場合、セッション管理サーバは、REFER メソッドにより、対象となる通信端末へセッションの確立先、あるいは削除先を通知することで、セッションの確立あるいは削除を要求する (図 6 (5)-(6))。

たとえば、アプリケーションをテレビ会議 (映像+音声) から、音声会議 (音声) へ切り替える場合、参加端末間の映像セッションが不要である。したがって、要求元端末と要求先端末間の映像用セッションを削除する必要がある。一方、要求元端末が、アプリケーションを音声会議からテレビ会議に切り替えたい場合は、要求元端末間と要求先端末間ならびに要求先端末間で新たに映像用セッションを追加する必要がある。

通信リソース切替え完了後、グループの通信状況が変化する可能性がある。具体的には、通信端末の切替



Sn: 代表端末数, SI: 従属端末数, N: 参加端末の総数
CS: 会議サーバ, CN: センタサーバ型
FM: フルメッシュ型, HB: ハイブリッド型

図 7 ネットワークポロジ構成のための条件式
Fig. 7 Conditional expression.

えでは、グループを構成する参加端末の種類が変化する。また、アクセスネットワーク切替えでは、参加端末のデータ到達遅延が変化する。さらにアプリケーション切替えでは、アプリケーションに応じて処理負荷が変化する。このため、通信リソース切替えが発生した場合、セッション管理サーバは、代表端末ならびに従属端末の決定を行う (図 6 (7), 図 3 (2))。

3.6 ネットワークポロジの動的構成

セッション管理サーバは、3.4 あるいは 3.5 節で決定した代表端末や従属端末の数に応じて、ネットワークポロジを決定する (図 6 (8), 図 3 (3))。そのネットワークポロジの動的構成のための条件式を図 7 に示す。

グループに従属端末が存在しない場合、すべての参加端末間でメディアの直接送受信が可能のため、ネットワークポロジはフルメッシュ型となる (図 7 (1), 図 1 (b))。一方で、1 台以上の従属端末が存在するが、代表端末は存在せず、代表端末あるいは従属端末になるための閾値に達しない参加端末の数が 2 台以上存在する場合、従属端末は会議サーバに収容される。また、従属端末を除く参加端末は、端末間で直接通信するため、ネットワークポロジは、会議サーバを利用したハイブリッド型となる (図 7 (2), 図 2 (b))。従属端末を除く参加端末の数が 1 台の場合、ネットワークポロジは、形式的にセンタサーバ型となる (図 7 (3), 図 1 (a))。

一方、従属端末ならびに代表端末が 1 台以上存在する場合において、参加端末の総数が 3 台以上であれば、ネットワークポロジは会議サーバを利用しないハイブリッド型となり (図 7 (4), 図 2 (a))、2 台であれば、1 対 1 の通信 (形式的にはフルメッシュ型) となる (図 7 (5))。

決定したネットワークポロジが現状のネットワークポロジと異なる場合、セッション管理サーバは、セッション制御の対象となる参加端末に対して、UPDATE メソッドを使用して経路情報の更新を要求する (図 6 (9)-(10))。なお、要求を受信した参加端末

は、受信した経路情報に基づき、自端末の経路表を更新し（図 6(11)、図 3(3)）、アプリケーションをテレビ会議から音声会議へ切り替える（図 6(12)）。

4. 提案方式の実装概要

以下に、プロトタイプの実装概要を示す。

- (1) OS は Linux Kernel 2.6.11 を使用した。
- (2) アプリケーションは、映像送受信用に VIC (Video Conference Tool)⁵⁾、音声送受信用に RAT (Robust Audio Tool)⁶⁾ を使用した。VIC と RAT を用いることにより、映像のセッションと音声のセッションを分離し、メディアごとに独立した制御を可能とした。通信リソース切替え要求の受信などにより、メディアの送信先の変更が必要な場合においても、会話を継続するため、VIC や RAT の両アプリケーションは終了せず、送信先だけ変更されるように実装した。
- (3) 高性能端末としてデスクトップ PC (以下、固定端末)、低機能端末として携帯電話を模擬したラップトップ PC (以下、移動端末) を使用した。
- (4) 参加端末において、通信環境情報のパラメータである CPU 使用率、メモリ使用率の定期的な取得には、参加端末に Linux で利用可能な sysstat ユーティリティを利用した。

5. 提案方式の性能評価

5.1 実験環境と実験項目

5.1.1 ネットワークおよび機器の構成

図 8 にネットワーク構成図を示す。セッション管理サーバ、会議サーバ、およびグループを構成する参加端末として固定端末 4 台 (FN1 ~ FN4) と移動端末 1 台 (MN1) をネットワーク接続した。IEEE802.11b で接続される MN1 以外は、すべて有線 (100BASE-TX) で接続される。FN1 と FN2, FN3 と FN4 はそれぞれ PC ルータ 1 および PC ルータ 2 の配下に位置する。MN1 は PC ルータ 3 の配下に位置する。

各機器の CPU とメモリについて、固定端末ならびにすべてのサーバは 2 GHz の CPU と 1 GB のメモリを、移動端末は 1.3 GHz の CPU と 256 MB のメモリを備えている。移動端末は携帯電話 (特にスマートフォン) を模擬しているため音声のみ処理可能とし、処理性能情報として擬似的に CPU を 400 MHz、メモリを 32 MB と設定した。この処理性能情報によって MN1 は従属端末となる。

本実験では、インターネットや携帯網における他の

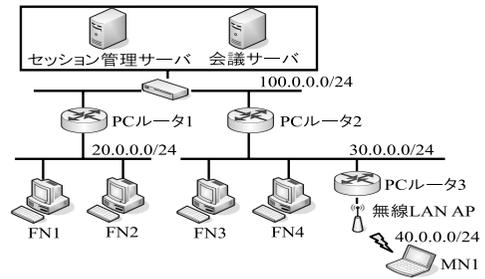


図 8 ネットワーク構成図

Fig. 8 Network architecture.

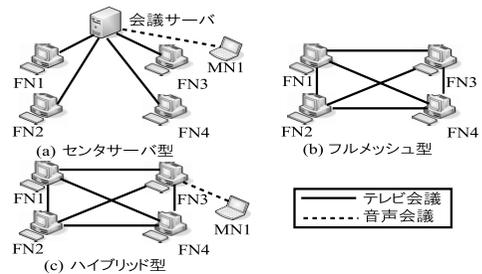


図 9 ネットワークボロジの構成図

Fig. 9 Configuration of network topologies.

トラフィックやルータの処理などによる影響を抑制して性能評価を行うため、ローカルネットワーク上でプロトタイプを構築した。ただし、固定網と移動網の遅延差を明確にするため、nistnet⁷⁾ を使用した。具体的には、PC ルータ 1, 2, 3 に nistnet をインストールし、固定端末間、固定端末とサーバ間で送受信されるパケットには一律 10 ms、移動端末と固定端末間、移動端末とサーバ間で送受信されるパケットには一律 40 ms の遅延を発生させた。

5.1.2 ネットワークボロジの比較

(1) 各ネットワークボロジでのデータ到達遅延ならびにデータ到達率の測定

本実験では、センタサーバ型、フルメッシュ型、ハイブリッド型でのグループ型通信を実行した。ネットワークボロジの構成図を図 9 に示す。固定端末間はテレビ会議を、固定端末と移動端末間は音声会議を実行する。なお、図 9(c) において、従属端末 MN1 が代表端末 FN3 に収容されるよう各端末における処理性能情報を調整した。

図 9(a) ~ (c) のトポロジにおいて、1 グループの参加人数が 5 人のグループ数を増加させた場合における会議サーバや各端末間のデータ到達遅延ならびにデータ到達率を測定する。なお、増加するグループの参加端末は、会議サーバと接続するが、図 8 で示したセグ

メントとは別のセグメントに接続する。測定では、有線と無線の区間でデータ到達遅延は異なるため、固定端末間の遅延と、固定端末-移動端末間の遅延を区別して測定する。また、測定時間は180秒とした。

(2) 代表端末変更によるデータ到達遅延測定

本実験では、ネットワークポロジ動的構成機能において、ある代表端末が収容する従属端末を別の代表端末に移動した場合における代表端末のデータ到達遅延の変動を測定することにより、ネットワークポロジ動的切替え機能の性能を評価した。

ハイブリッド型のネットワークポロジにおいて、従属端末である MN1 が従属する代表端末を FN3 とし、FN1, FN2, FN3 ならびに FN4 はメディアを直接送受信する。このような状態で、MN1 をルータ 1 の配下に移動させ、代表端末を FN2 に変更した場合のデータ到達遅延を測定する。

5.1.3 ネットワークポロジの動的切替え

本実験では、グループ型通信中に通信リソース切替えを発生させることで、ネットワークポロジを動的に再構成させた。

まず、図 9(b) に示すフルメッシュ型で通信中、FN1 のユーザが端末を FN1 から MN1 へ切り替え、その際にアプリケーションをテレビ会議から音声会議へ切り替える。この切替えにより、ネットワークポロジは、FN3 を代表端末、MN1 を従属端末とするハイブリッド型へと切り替わる。

(i) 端末切替え時間: t_1

FN1 が REFER メッセージによる端末切替え要求をセッション管理サーバへ送信後、他端末から端末切替え可能を示す 202 ACCEPT を受信するまでの時間を端末切替え時間とする(図 6(1)-(6))。

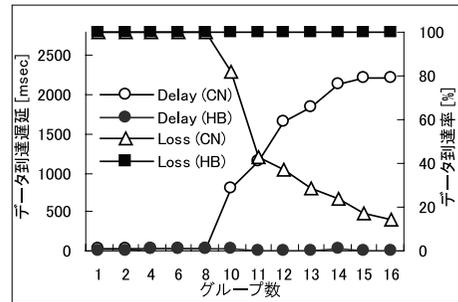
(ii) 経路切替え時間: t_2

ネットワークポロジがフルメッシュ型からハイブリッド型に切り替わるまでの時間を経路切替え時間とする。具体的には、セッション管理サーバが、NOTIFY に対する 200 OK を受信後、代表端末・従属端末を決定してから、参加端末がセッション管理サーバからの UPDATE メッセージ受信後、メディアの宛先を変更するまでの時間となる(図 6(7)-(11))。

(iii) メディア切断時間: t_3

FN1 において、テレビ会議の映像・音声データの受信が停止後、MN1 で音声データの受信を開始するまでの時間をメディア切断時間とする(図 6(11)-(12))。

さらに、フルメッシュ型からハイブリッド型への切替え以外における、ネットワークポロジ間の切替えを実施する環境を構築し、各ネットワークポロジの



Delay: データ到達遅延, Loss: データ到達率
CN: センターサーバ型, HB: ハイブリッド型

図 10 センターサーバ型とハイブリッド型での固定端末間におけるデータ到達遅延・データ到達率の比較

Fig. 10 Comparison of data delay and data arrival ratio of hybrid type with them center server type.

切替えにおいて、 t_1 , t_2 , t_3 を測定した。

5.2 実験結果と評価

5.1 節で述べた実験内容の測定結果とその評価を以下に示す。

5.2.1 ネットワークポロジの比較

(1) 各ネットワークポロジでのデータ到達遅延ならびにデータ到達率の測定結果と評価

固定端末間におけるデータ到達遅延ならびにデータ到達率の測定結果を図 10 に示す。センターサーバ型 (CN) では、会議サーバで収容するグループ数が 10 以上となった際に、会議サーバが接続する 100 [Mbyte/sec] の回線が輻輳し、データ到達率が低下したため、通話が困難となった。また、固定端末-移動端末間においても、固定端末間と同様にグループ数が 10 以上で輻輳する結果となった。一方、ハイブリッド型 (HB)、フルメッシュ型では、グループ数の増加による影響はなかった。

以上の結果から、ハイブリッド型は、センターサーバ型で利用する会議サーバへのアクセス集中を回避可能であることが分かる。さらに、ハイブリッド型は、フルメッシュ型で問題となっていた低機能端末の収容が可能であることが確認できた。

(2) 代表端末変更によるデータ到達遅延の測定結果と評価

MN1 が無線 LAN AP に接続し、代表端末である FN3 経由で固定端末と通信した場合、各端末間におけるデータ到達遅延の中で、最大となった区間は、MN1-FN1 間および MN1-FN2 間であり、113 [msec] であった。次に、MN1 が PC ルータ 1 に接続した場合においても、MN1-FN1 および MN1-FN2 の区間が最大となり、156 [msec] となった。一方、ネットワークポロジ動的構成機能を利用した場合は、MN1 の代表端末が

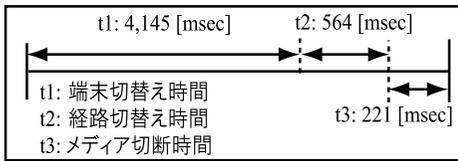


図 11 ネットワークボロジ切替え時間

Fig. 11 Times for dynamic network topology configuration.

FN3 から FN2 に変更された。結果、FN1 へのデータ到達遅延は 46 [msec] であり、データ到達遅延が最大となる区間である MN1-FN4 間および MN1-FN3 間との通信においても、112 [msec] となった。したがって、本実験では、代表端末の変更により、データ到達遅延の最大値を、44 [msec] 短縮可能であることが確認できた。

以上の結果から、代表端末の変更により、データ到達遅延の平均値を抑制可能であることがいえる。したがって、複数の代表端末を用いる本方式は、よりリアルタイムな通信を実現可能であることがいえる。

5.2.2 ネットワークボロジの動的切替え

ネットワークボロジ切替え時間の測定結果を図 11 に示す。本実験における端末切替え時間 t_1 は、約 4,145 [msec] であった。このうち約 2,354 [msec] は、セッション管理サーバが、FN1 から NOTIFY に対する 200 OK を受信後、他の端末へ切替え要求メッセージを送信するための内部処理に要した時間である。また、経路切替え時間 t_2 は 564 [msec] であり、メディア切断時間 t_3 は、221 [msec] であった。

さらに、フルメッシュ型からハイブリッド型以外におけるネットワークボロジの切替えに必要な時間を測定したが、図 11 の結果とほぼ同じ値であり、REFER などのコントロールパケットの到達遅延のゆらぎが数 msec 変化したのみであった。ほぼ同じ値の結果になった理由は、図 6 に示すシーケンス図のとおり、すべてのネットワークボロジ切替えにおいて、切り替える手順は同じであり、測定値の変動はコントロールパケットの到達遅延によるものであったためである。

以上の測定結果から、通信リソース切替えにともないネットワークボロジが変化した場合においても、ユーザレベルでのサービスの切断はほとんど体感されず、サービスの継続が可能であることを確認できた。

6. 既存研究

これまでに、グループ型通信のための様々なフレームワークが検討されてきた。たとえば、IETF においては、SIP³⁾ を用いたグループ型通信のためのフレ

ームワークが検討されている⁸⁾⁻¹¹⁾。IETF では、安定した環境をユーザに提供するため、ダイヤルイン・アウト方式と呼ばれるセンタサーバ型のトポロジが主に議論されてきた⁸⁾。IETF 以外の様々な機関においても、グループ型通信に利用する主なネットワークボロジは、センタサーバ型を利用している。一方で、システム導入の容易さから、P2P 通信を行うフルメッシュ型のトポロジ¹²⁾⁻¹⁴⁾ も検討され始めている。IETF においても P2P-SIP¹⁵⁾ と呼ばれる SIP を用いた P2P 通信のためのフレームワークが、提案・議論されている。

しかしながら、IETF で提案・議論されているフレームワークでは、ヘテロジニアスな環境下でのリアルタイムグループ通信において、アクセス集中によるデータ到達遅延やパケット損失の問題（センタサーバ型の問題）や低機能端末の収容などの問題（フルメッシュ型の問題）がある。さらに、既存のフレームワークでは、参加端末の通信状況や処理負荷状況に応じて、適したネットワークボロジを構成することが困難である。

このような問題に対し、本論文で提案したハイブリッド型は、5.2.1 項で述べたトポロジの比較結果から、P2P 通信を行うフルメッシュ型においても異種端末の収容が可能である。さらに、センタサーバ型と比較して、アクセス集中の回避により、グループ型通信が実現可能である。さらに、ネットワークボロジ動的構成機能により、参加端末の情報に応じてネットワークボロジを柔軟に再構成可能であることを確認した。したがって、提案方式は、既存のネットワークボロジにおける問題を解決していることがいえる。

また、端末の通信状況（データ到達遅延）に応じて、ネットワークボロジを構成する方式が提案されている¹⁶⁾。しかしながら、文献 16) では、ストリーミング配信サービスの提供を目的としており、1 方向のデータ配信を行うモデルを対象としている。一方で、本方式は、テレビ会議などのリアルタイム通信サービスの提供を目的としており、数人で構成されるグループの中で双方向のデータ通信を行うモデルを対象としている。つまり、すべての参加端末がデータを送受信することになるため、既存の方式で双方向のグループ型通信を行う場合、参加端末の数だけツリーを構築する必要がある。したがって、参加端末数が増加するほど、その計算量は増加していくため、各端末の処理負荷が増加していくという問題が発生する。

さらに、文献 16) では、処理性能の低い端末が接続するネットワークの帯域と処理性能の高い端末が接続するネットワークの帯域の差がほとんどない場合、処理性能の低い端末も、処理性能の高い端末と同じく、

ツリーの上位側に配置されることになる。この結果、処理性能の低い端末においても、データの転送処理が要求されるため、この端末で起動している他のアプリケーションの挙動に影響を与える恐れがある。この問題に対し、本方式のネットワークポロジ動的構成機能では、データ到達遅延に加えて、端末の処理能力や負荷状況も考慮している。具体的には、負荷状況を基準に代表端末になるかどうかを判定した後、各端末間のデータ到達遅延の平均が、最小となるようにネットワークポロジを構成する。

したがって、本論文で提案したネットワークポロジ動的構成機能により、参加端末の通信状況や処理負荷状況に応じたネットワークポロジの柔軟な対応が実現できる。

通信リソース切替えに関しては、サービスを継続しながらも通信端末の切替えが可能なホスト間モビリティ技術が提案されている¹⁷⁾。また、Mobile IP¹⁸⁾では、ホームアドレスで他端末と通信することにより、端末が移動し、アクセスネットワークを切り替えた場合においても、リアルタイム通信の継続が可能となる。しかしながら、ホストモビリティでは、アクセスネットワークやアプリケーションの切替えが困難である。たとえば、1つの端末で受信・再生していた映像データと音声データを、別端末に振り分けることが困難であった。しかしながら、本方式を用いれば、5.2.2項の実験結果により、グループ型通信サービスを切断することなく、通信リソースの切替えが実現可能である。さらに通信リソース切替え後は、ネットワークポロジ動的構成機能により、適したネットワークポロジへ切替え可能である。

7. む す び

本論文では、様々な形態のグループ型通信の普及にともない、移動端末や固定端末が混在するヘテロジニアスな通信環境下に適したハイブリッド型のネットワークポロジを示した。さらに、異種端末の収容、データ処理遅延ならびにデータ到達率の観点から、既存のネットワークポロジであるセンタサーバ型やフルメッシュ型と性能評価を比較した結果、ハイブリッド型がヘテロジニアスな通信環境下で有効であることを確認した。

また、移動網と固定網の融合が急速に進み、端末の種類やアクセスネットワークに依存することがないグループ型通信の開始や継続するシステムが必要となったため、本論文では、ユーザの周辺状況に応じて適切な通信リソースに切り替えることが可能なグループ型

通信対応通信リソース切替え方式を示した。さらに、グループ型通信対応サービス切替え方式により、通信端末の種類や通信状態が変化した場合においても、最適なネットワークを決定・構成する、ネットワークポロジ動的構成方式を提案した。そして、これらの方式に基づいたプロトタイプシステムを試作し、性能評価実験実施した。その結果、ユーザの周辺状況により、グループ通信での通信リソースの切替えが可能であることを確認した。さらに、ネットワークポロジ切替え時間の観点から、通信リソース切替えによりグループ通信の通信環境が変化した場合においても、サービスを切断することなく、通信環境に適したネットワークポロジを動的に構成することを確認し、本方式の有効性を示した。

謝辞 日頃ご指導いただく(株)KDDI 研究所秋葉所長、鈴木執行委員に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) KDDI Introduces New au Cellular Handsets Offering One Seg Function for "EZ TV" and New "Hello Messenger" Service (2005). http://www.kddi.com/english/corporate/news_release/2005/1024/index.html
- 2) Imai, N., Isomura, M. and Horiuchi, H.: Flexible and Seamless Service Migration for Real-time Communication with Ubiquitous and Heterogeneous Networked Resources, *Proc. 47th annual IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom 2004)*, pp.988-994 (2004).
- 3) Rosenberg, J., Schulzrinne, H., Camarillo, G., Johnston, A., Peterson, J., Sparks, R., Handley, M. and Schooler, S.: SIP: Session Initiation Protocol, RFC3261 (2002).
- 4) Eyeball Messenger SDK (2006). http://www.eyeball.com/products/mess_sdk.html
- 5) Video Conference Tool. <http://www-mice.cs.ucl.ac.uk/multimedia/software/vic/>
- 6) Robust Audio Tool. <http://www-mice.cs.ucl.ac.uk/multimedia/software/rat/>
- 7) Parker, S. and Schmechel, C.: Some Testing Tools for TCP Implementors, RFC2398 (1998).
- 8) Rosenberg, J.: A Framework for Conferencing with the Session Initiation Protocol (SIP), RFC4353 (2006).
- 9) Mahy, R., Campbell, B., Sparks, R., Rosenberg, J., Petrie, D. and Johnston, A.: A Call Control and Multi-Party Usage Framework for the Session Initiation Protocol, draft-ietf-

- sipping-cc-framework-07 (2007).
- 10) Miladinovic, I. and Stadler, J.: Multiparty Conference Signaling Using the Session Initiation Protocol (SIP), *Proc. 3rd International Network Conference (INC 2002)*, pp.191-198 (2002).
 - 11) Singh, K., Nair, G. and Schulzrinne, H.: Centralized Conferencing using SIP, *Proc. 2nd IP-Telephony Workshop (IPTel 2001)* (2001).
 - 12) Singh, K. and Schulzrinne, H.: Peer-to-peer Internet Telephony using SIP, *Proc. 15th Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV 2005)*, pp.63-68 (2005).
 - 13) Khedher, B., Glitho, R. and Dssouli, R.: Media Handling for Multiparty Sessions in Ad-hoc Peer-to-Peer Networks, *Proc. 10th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2005)*, pp.131-136 (2005).
 - 14) Fu, C., Glitho, R. and Dssouli, R.: A Novel Signaling System for Multiparty Sessions in Peer-to-Peer Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2005)*, pp.2287-2292 (2005).
 - 15) Bryan, D., Lowekamp, B. and Jennings, C.: A P2P Approach to SIP Registration and Resource Location, draft-bryan-sipping-p2p-03 (2006).
 - 16) Banerjee, S., Kommareddy, C., Kar, K., Bhattacharjee, S. and Khuller, S.: Construction of an efficient overlay multicast infrastructure for real-time applications, *Proc. 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, pp.1521-1531 (2003).
 - 17) Nilanjan, B., Sajal, K. and Arup, A.: SIP-based Mobility Architecture for Next Generation Wireless Networks, *Proc. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (Percom 2005)*, pp.181-190 (2005).
 - 18) Perkins, C.: IP Mobility Support for IPv4, RFC3344 (2002).

(平成 19 年 4 月 10 日受付)

(平成 19 年 10 月 2 日採録)



田坂 和之 (正会員)

平成 16 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報システム学専攻修士課程修了。同年 KDDI (株) 入社。現在, KDDI 研究所コビキタスネットワークグループ所属。モバイルネットワーク、ホームネットワーク、ITS (高度道路交通システム) の研究開発に従事。本会平成 18 年度全国大会奨励賞, DICOMO2007 優秀論文賞を各受賞。電子情報通信学会会員。



今井 尚樹 (正会員)

平成 10 年東京大学工学部電気工学科卒業。平成 12 年同大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻修士課程修了。平成 15 年同博士課程修了。同年 KDDI (株) 入社。現在, KDDI 研究所コビキタスネットワークグループ所属。工学博士。モビリティサポート, ホームネットワーク, NGN (次世代ネットワーク), ITS (高度道路交通システム) の研究開発に従事。電子情報通信学会会員。



磯村 学

平成 7 年名古屋工業大学工学部電気情報工学科卒業。平成 9 年同大学大学院工学研究科電気情報工学専攻修士課程修了。同年日本高速通信 (株) (現 KDDI (株)) 入社。現在, KDDI 研究所コビキタスネットワークグループ所属。ネットワーク管理, ネットワークプロトコル, モバイルネットワーク, ITS (高度道路交通システム) の研究開発に従事。電子情報通信学会平成 14 年度学術奨励賞を受賞。電子情報通信学会会員。



堀内 浩規 (正会員)

昭和 58 年名古屋大学工学部電気工学科卒業。昭和 60 年同大学大学院情報工学専攻修士課程修了。同年国際電信電話 (株) (現 KDDI (株)) 入社。現在, KDDI 研究所執行役員。工学博士。ネットワークアーキテクチャ, 通信プロトコルの形式記述, ネットワーク管理, 分散処理の研究に従事。電子情報通信学会平成 4 年度学術奨励賞, 本会平成 8 年度ならびに平成 12 年度全国大会優秀賞を各受賞, 電子情報通信学会, IEEE 各会員。