

利用制限のあるネットワーク下でプレゼンテーション同期をするための遠隔講義支援ツールの開発

井上 博之^{†1,†2} 日山 雅之^{†3}
近 堂 徹^{†2,†4} 前 田 香 織^{†1}

広域ネットワークを用いた大学キャンパス間や大学間をまたがる遠隔講義が増えて
いる．遠隔講義は学生が移動することなく様々な講義の受講を可能とし、学生の教育
機会を増やすことができるが、対面講義と同様の質を保つことが課題である．複数拠
点間の教材のプレゼンテーション同期もその1つで、従来から種々のプレゼンテー
ション同期の提案がされているものの、セキュリティ上の観点からネットワークの利
用制限が厳しくなる中で、複数大学のネットワークの運用方針にそれぞれ対応できる
システムは限られる．同時に、運用面からは、講演者が一般的に使用する PowerPoint
というプレゼンテーションツールに対応している必要もある．そこで、利用者環境に
存在するファイアウォールや NAT 等のネットワーク障害物に応じて対応方法を選択
するプロトコルを搭載することにより、様々なネットワーク障害物の配下で動作でき
るプレゼンテーション同期支援ツール GOZARU+の開発を行った．本論文ではネット
ワーク障害物の分類とその対応方法について述べ、開発した支援ツールの概要につ
いて述べる．また、様々なネットワーク障害物が介在する場合の利用に関する評価や
実際のインターネットサービスプロバイダや遠隔講義で使用した実証実験を通して、
ツールの有効性を示す．

Development of a Support System of Interactive Distance Learning to Synchronize Presentation Materials in Network Obstructions

HIROYUKI INOUE,^{†1,†2} MASAYUKI HIYAMA,^{†3}
TOHRU KONDO^{†2,†4} and KAORI MAEDA^{†1}

The use of broadband wide-area networks with interactive distance learning,
whether in different campuses or over several universities, has recently been

increasing. While distance-learning enables students to receive classes in the
convenience of their own homes and gives them more educational opportunities,
it is important to maintain the quality of these classes at a level on par with on-
campus classes. Although various presentation synchronization systems have
been proposed, it is difficult to use them at every university due to different op-
erational regulations that is becoming more rigorous recently because of security
policies. We developed a presentation synchronization tool called “GOZARU+”
that implements the convenient features to overcome network obstructions. It
features a protocol that selects the correspondence method according to ob-
structions; for example, users’ firewalls and NATs. We tested GOZARU+ on
several different network obstructions and evaluated its effectiveness with ISPs
networks and remote lectures among several universities.

1. はじめに

広域ネットワークやテレビ会議システムの普及により、双方向リアルタイムの遠隔講義が
実施されることが増えてきている¹⁾．遠隔講義は自宅にいながら受講したり、受講生が移動
することなく多様な講義を受講できたりと教育機会を増やすことに貢献している．特に大学
間の単位互換が増え、他大学の講義を受講できる環境は今後も増えていくと予想される²⁾．
遠隔講義におけるメリットもある一方、できるだけ講義の質を対面講義と同じように維持す
るための支援技術を必要とする．映像の品質や臨場感の向上に加え、多地点での教材を共有
しプレゼンテーションを同期する仕組みも提供しなければならない．

著者らの大学においても 2004 年から京都大学、慶應義塾大学との遠隔講義を始め、現在
はキャンパスプラザ京都を含めた 4 拠点で毎年実施している³⁾．4 拠点での遠隔講義の教材
共有に、自ら開発した GOZARU⁴⁾ を使用している．GOZARU は、Microsoft PowerPoint
と協調して動作するアプリケーションプログラムであり、講演者 PC でのスライドの制御情
報を直接、受講者 PC へ送信することにより、講演者 PC と受講者 PC のスライドの動作

†1 広島市立大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University

†2 情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications Technology

†3 長岡技術科学大学大学院

Nagaoka University of Technology

†4 広島大学情報メディア教育研究センター

Information Media Center, Hiroshima University

を同期することができる。スライドの制御情報のみを送信するため、同期に必要なネットワークのトラフィックが非常に小さいのが GOZARU の長所である。しかし、拠点数が増えるにつれ、拠点ごとのネットワークセキュリティポリシーや IPv4 および IPv6 の利用の可否が異なる等、ネットワークの利用制限や運用方針の違いに関する考慮が必要となってきた。このことは一般的に複数大学間での遠隔講義をする場合に問題となる点である。IPv4 ネットワークにおいてはファイアウォールや NAT/NAPT⁵⁾ (アドレス・ポート変換装置、以下、NAT と記す) 等のネットワーク障害物⁶⁾ が展開の妨げになるケースが多い。特に NAT は、広く普及してきた家庭の常時接続環境や、大学や企業のような組織のネットワークに多く導入されており、教材共有ツールの使用時にはその対応が必須となってきた。

そこで、クライアントの介在するネットワーク障害物に応じて、ネットワーク障害物対応方法を選択するプロトコルを既存の遠隔プレゼンテーション同期システム GOZARU に搭載することにより、様々な環境で動作することができる遠隔プレゼンテーション同期システム GOZARU+ (GOZARU プラス) を開発した。

以降では、まず 2 章で本研究の関連技術について述べ、3 章で GOZARU+ の設計について述べ、4 章でその実装について述べ、そして、5 章でその評価と考察を行う。最後に 6 章でまとめを行う。

2. ネットワーク障害物対応技術と遠隔プレゼンテーション同期システム

本章では、現在、多くの環境で使用されているネットワーク障害物と、それに対応するための技術や、その技術を用いている既存のシステムについて述べる。また、本研究で開発した遠隔プレゼンテーション同期システムの関連研究について述べる。

2.1 ネットワーク障害物対応技術

NAT は、組織内のプライベート IP アドレスを、インターネット上のグローバル IP アドレスへ変換することで、グローバル IP アドレスの使用量を減らすことができ、またファイアウォールの機能を提供できることから、多くの組織で利用されている。特に、ISP (Internet Service Provider) が提供する家庭向けのインターネット接続サービスの多くは、契約者に 1 つのグローバル IP アドレスを割り当て、NAT を使用することで、家庭内のネットワークにおいて複数のプライベート IP アドレスを使用可能としている。一般的に、NAT 配下にある通信機器 (以下、ノード) にはプライベート IP アドレスが割り当てられ、あるノードに対して NAT の外部からは IP アドレスを使用して一意に特定し直接の通信を行うことができない。そのような状況下で直接通信を可能にさせる技術として、NAT Traversal

技術 (NAT 越え技術) がある。NAT Traversal 技術の代表的な手法としては、UDP Hole Punching⁷⁾, Relaying⁷⁾, UPnP⁸⁾ がある。

UDP Hole Punching とは、NAT の内側に置かれたノードが、内側からある UDP パケットを送信して NAT に穴を開け、NAT の中にあるノードどうしが第三者を介さずに UDP での通信を可能とする技術である。UDP Hole Punching を実行するためには、通信相手の変換後の IP アドレスおよびポート番号が必要となる。それを支援するプロトコルに STUN (Simple Traversal of UDP through NATs)⁹⁾ がある。STUN は、アプリケーションがグローバルネットワークとの間の NAT およびファイアウォールの存在と種類を調べることができるプロトコルである。Relaying (中継) はグローバルネットワークにあるリレーサーバを経由して、NAT を介したノード間の通信を行う技術である。UPnP (Universal Plug and Play) とは、Microsoft 社が提唱した概念で、PC や家電製品等をネットワークを通じて相互に機能を提供し合う技術である。

また、NAT は、アドレスの変換方法やフィルタリングの機能によって、Full Cone, Restricted Cone, Port Restricted Cone, Symmetric の 4 つに分類される⁹⁾。組織のネットワークの入口に設置されるファイアウォールも NAT と同様に、一般的に、組織内からインターネットおよび他組織への接続は自由に許可し、組織外からの接続に制限を行っている。ファイアウォールに対応するための直接通信技術は、前述の NAT Traversal 技術と同様に扱えるため、以下では NAT Traversal 技術としてまとめて扱う。

2.2 遠隔プレゼンテーション同期システムの関連研究

PowerPoint のスライドを共有できるような、1 対多拠点の遠隔プレゼンテーション同期システムについての関連研究として、RPT¹⁰⁾, Mppt¹¹⁾ 等のシステムがあり、また、商用のサービスおよびソフトウェアとして Microsoft Office Live Meeting¹²⁾ がある。

RPT (Remote Point) は講演者 PC の、PowerPoint のスライドショーを監視し、スライドの遷移とポイントの動きに関する制御情報を IRC (Internet Relay Chat) プロトコル^{13),14)} を用いて受講者 PC へ送信することで、講演者 PC と受講者 PC のスライドショーの動作を同期させている。1 対多拠点との同期が可能で、制御情報を IRC サーバ経由で送信しているため、ネットワーク障害物が介している環境であっても使用することができるが、IPv6 やマルチキャストには対応していない。また、IRC 自体は広範囲での使用は考慮に入れておらず¹⁴⁾、RPT の使用範囲が限定されてしまうという点も問題点にあげられる。

Mppt (Multicast PowerPoint Add-in) は、PowerPoint をマルチキャスト通信に対応させるプラグインで、講演者 PC では、現在表示しているスライドと、次に表示する予定のス

ライドのデータをマルチキャストのグループアドレスに送信する。また、別のグループアドレスを利用して、詳細なスライドの制御情報を送信する。受講者 PC は、講演者 PC からマルチキャストされた情報を受信し、講演者 PC とスライドの同期を行う。しかし、ポイントの同期やスライドへの描画はできない。また、マルチキャスト通信で制御情報を送ることにより、小さいネットワーク負荷で多拠点と同期をすることができるが、通信経路上のルータすべてがマルチキャスト対応でないとならなかったり、ファイアウォール配下である場合は、マルチキャストトラフィックを許可するようにファイアウォールに特別な設定が必要となったりする等、多くの環境で使用できるシステムであるとはいえない。

Microsoft Office Live Meeting は、Microsoft 社が有償で提供するサービスおよび Office Communications Server というソフトウェアである。前者のサービスは、IPv6 やマルチキャストにも対応しているが、共有できるコンピュータの数が 250 台あるいは 1,250 台までという制限がある。また、後者のソフトウェアを購入し自前のサーバを用意することで、共有できるコンピュータの数にライセンス上の制限はなくなるが、IPv6 に対応できなくなる。

3. GOZARU+の概要

3.1 GOZARU の概要

GOZARU⁴⁾ とは、リアルタイムの双方向遠隔講義等において、講演者の指示するスライドや描画の内容を同期して受講者に送ったり（リアルタイムモード）、リアルタイムモードで保存されたログファイルを、スライドや講義ビデオとともに再生したり（再生モード）できるシステムである。

GOZARU の構成を図 1 に示す。リアルタイムモードでは、Sender と Receiver の通信によって教材の同期が行われる。講演者の操作は Sender が受け、その制御情報（コマンド）が Receiver に転送される。受信した Receiver はその制御情報を読み取り、教材の描画やマウスポインタの位置等（オブジェクト）の同期を行う。制御情報の送信には UDP が用いられている。そのため、Sender が定期的に現在のオブジェクトの状態を Receiver に通知し、Receiver の状態を最新の Sender の状態に合わせることで、信頼性の向上を図っている。Sender は講演者の操作をログファイルに残すことも可能であり、その再生モードでは reProducer がログファイルを読み込み講演者のスライド操作を再現する。また、IPv6 やマルチキャスト通信にも対応している。

GOZARU では、PowerPoint のスライド画面やそのアニメーションをそのままの映像や画像でなく、講演者の操作情報すなわちイベントとして配信し、講演中の教材とその操作を

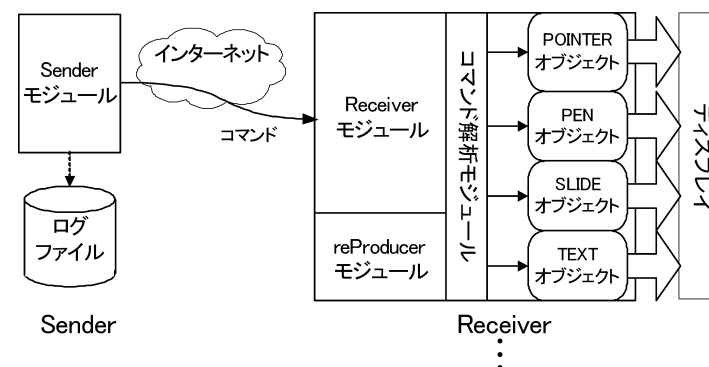


図 1 GOZARU のシステム構成図
Fig. 1 System structure of GOZARU.

複数拠点で共有しプレゼンテーション同期をする。その結果、通信に必要なトラフィックは非常に小さく、また画面劣化もないという特徴がある。

3.2 ネットワーク障害物への対応

講演者側の GOZARU（送信者）と視聴者側の GOZARU（受信者）の間で教材の同期を開始するには、送信者が受信者に対して接続を行う。著者らが実施している 4 拠点間の講義では IPv6 ネットワーク上でこの形態を使用していた。

IPv4 ネットワークで多く導入されている NAT 配下においては、GOZARU の動作する端末の IP アドレスが組織内のプライベートアドレスとなり直接の接続はできない。ファイアウォールが導入されている場合も同様である。これらのネットワーク障害物がある場合、端末どうしが通信を行うには何らかの工夫が必要となる。たとえば、様々なネットワークの下で使用されることが想定されている Skype では、NAT Traversal 技術として登録サーバや中継サーバ等を利用することで種々のネットワーク障害物に対応している¹⁵⁾。

今回、ネットワーク障害物が存在するネットワークでも教材の同期ができるように、GOZARU のシステムに、図 2 のようにネットワーク障害物の種別を検出するための STUN サーバと、送信者と受信者の仲介（Broker）と必要に応じてデータの中継（Relay）を行うための補助サーバを導入する。送信者と受信者の GOZARU は、STUN サーバを利用して自身とインターネット間のネットワーク障害物の種別を識別する。同時に、インターネット上に設置された Broker の助けを借りて、送信者と受信者の間の通信方法を決定する。

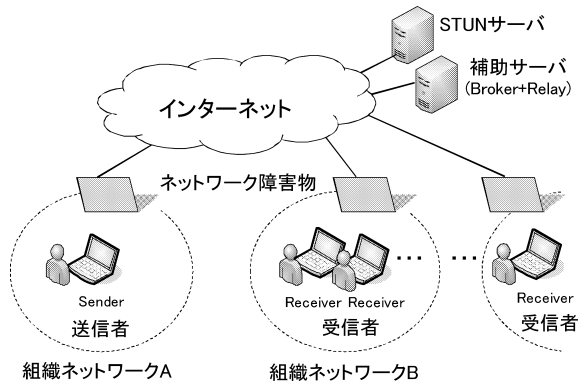


図 2 ネットワークモデル

Fig. 2 Network model.

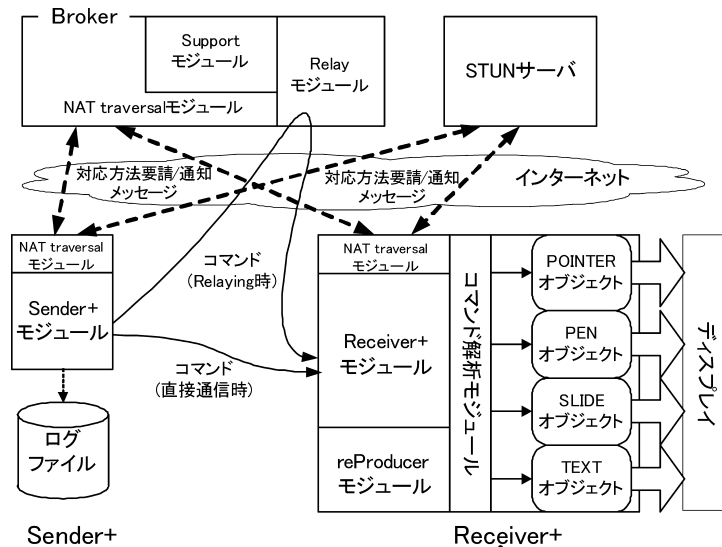
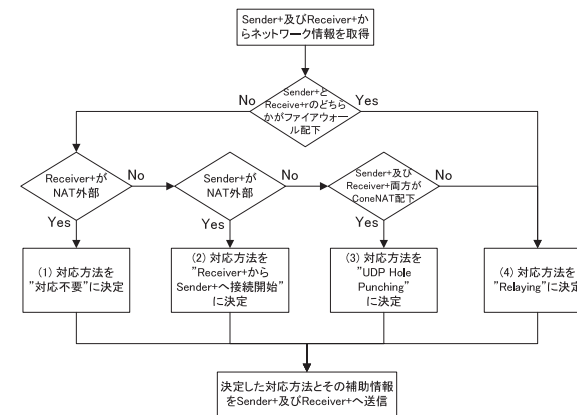


図 3 GOZARU+のシステム構成図

Fig. 3 System structure of GOZARU+.

Receiver+ Sender+	ネットワーク 障害物なし	Cone NAT配下	Symmetric NAT 配下	ファイアウォール 配下
ネットワーク 障害物なし	対応不要	Receiver+から Sender+へ接続	Receiver+から Sender+へ接続	Relaying
Cone NAT配下	対応不要	UDP Hole Punching	Relaying	Relaying
Symmetric NAT 配下	対応不要	Relaying	Relaying	Relaying
ファイアウォール 配下	Relaying	Relaying	Relaying	Relaying

(a) 対応方法の組み合わせ



(b) 対応方法決定アルゴリズム

図 4 ネットワーク障害物の分類と対応方法決定アルゴリズム

Fig. 4 Classification of network obstructions and the algorithm for judgment.

3.3 GOZARU+の概要と拡張機能

GOZARU+は Sender+、Receiver+、reProducer、Broker の 4 つから構成される。システムの構成を図 3 に示す。システム構成の基礎概念は GOZARU と同様であり、ネットワーク障害物対応部分を新たに追加している。Broker とはネットワーク障害物対応方法選択プロトコルを搭載したサーバであり、STUN サーバとともにグローバルネットワーク上に設置される。Sender+と Receiver+は教材同期を開始する前に、Broker へ対応方法要請メッセージを送ることで、対応方法通知メッセージを取得する。また、対応方法が Relaying であった場合は、Broker がリレーサーバの役割を果たし、Sender+が送信したコマンドは

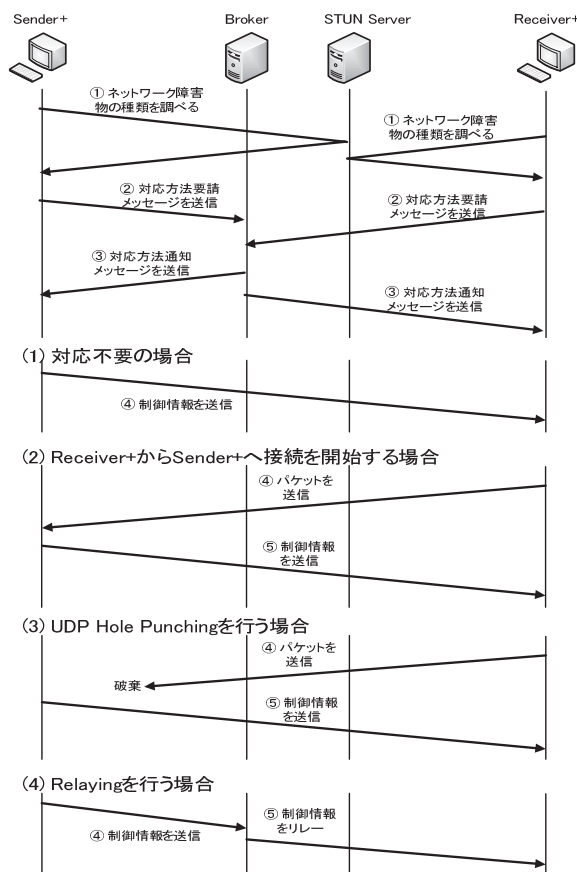


図 5 対応方法判定のための通信手順
Fig. 5 Communication sequences for mode judgment.

Broker を経由して Receiver+へ送られる。また GOZARU+では、教材を共有する単数の Sender+と単数または複数の Receiver+を教材共有グループとする。

ネットワーク障害物対応方法選択プロトコルとは、Sender+と Receiver+のインターネット接続に介在しているネットワーク障害物から、ネットワーク障害物対応方法（以下、対応方法と記す）を選択し、対応方法とその補助情報を Sender+と Receiver+へ通知を行うプ

ロトコルである。Sender+と Receiver+のネットワークに応じて決定される対応方法の組合せを図 4 (a) に、対応方法の決定までのアルゴリズムを図 4 (b) に示す。

送受信者間のネットワークに、① ネットワーク障害物が介在していない場合、② Firewall がある場合、③ Full Cone NAT, Restricted Cone NAT, Port Restricted Cone NAT のいずれか（以下、Cone NAT と総称）がある場合、④ Symmetric NAT がある場合の 4 つに分類される。その対応方法は、それぞれ、(1) 対応不要、(2) Receiver+から Sender+へ接続開始、(3) UDP Hole Punching を行う、(4) Relaying を行う、の 4 つに分類される。

GOZARU+の各構成要素間のネットワーク障害物への対応をするための通信手順を、分類した 4 つの場合についてそれぞれ図 5 に示す。いずれの場合も、前半の手順は同様であり、Broker と STUN サーバを使用することでネットワーク障害物の種類を判定し、可能な限り直接通信を行うようにする。このような手順を経ることで、ネットワーク障害物を介するネットワーク間での遠隔プレゼンテーション同期を実現する。

4. GOZARU+の実装

講演者と受講者双方のネットワーク障害物に応じて、自動的に対応方法を選択する手順を以下ではオートモードと呼び、オートモードの実現のための GOZARU+の実装を中心に説明する。

4.1 機能モジュールの実装

図 3 に示した主要モジュールのうち、reProducer は既存の GOZARU のものをそのまま使用し、その他のモジュールについてネットワーク障害物に対応するような拡張を行った。Broker, Sender+, Receiver+の各モジュールのサブモジュールの構成と各モジュール間でのメッセージのやりとりを、図 6 に示す。

Broker の中核となるサブモジュールは、NAT Traversal モジュールであり、対応方法要請メッセージを受信し、対応方法を決定し、対応方法通知メッセージを送信する。また、対応方法の手順と結果に応じて、各サブモジュールを起動する。Support モジュールは、対応方法が UDP Hole Punching であった場合に支援を行うモジュールで、Sender+と Receiver+のペアが UDP を用いて対応方法受信モジュールで指定された識別番号を含んだメッセージを Support モジュールへ送ると、識別番号が同一である Sender+と Receiver+をペアとして認識し、互いの変換後の IP アドレスとポート番号を Sender+と Receiver+へそれぞれ通知する。Relay モジュールは、Sender+から送られてきた制御情報を Receiver+へ中継するモジュールである。なお、Relay モジュールはアプリケーションレベルゲートウェイとして

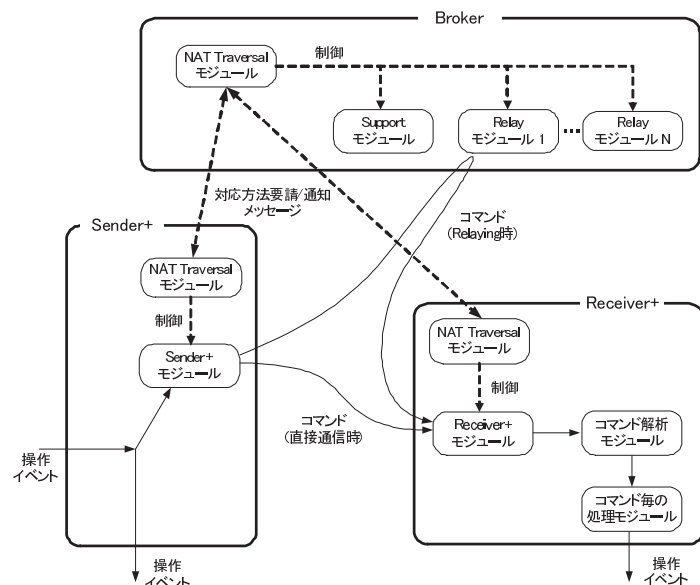


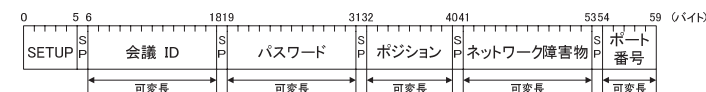
図 6 各機能モジュールの実装

Fig. 6 Implementations of main modules.

機能するため、送信者および受信者の中で IPv4 と IPv6 のネットワークが混在するような状況でも対応できる。

Sender+の NAT Traversal モジュールは、Broker から送られてくる対応方法通知メッセージを受信し、Sender+モジュールへ新たな通信方法を追加するように指示を行う。また、STUN サーバとの通信、Broker への対応方法要請メッセージの送信も行う。Sender+モジュールは、利用者のスライド操作のイベントを Receiver+へ同期データのコマンドとして送信する。送信方法は、NAT Traversal モジュールから指示された通信手順で行う。

Receiver+の Receiver+モジュールは、受信した同期データをコマンド解析モジュールへ渡す。受信方法は、Receiver+の NAT Traversal モジュールから指示された通信手順で受信を行う。コマンド解析モジュールは、渡されたコマンドがどのオブジェクト用のコマンドなのかを識別し、該当するコマンドオブジェクトにコマンドを引き渡す。各オブジェクトモジュールでは、コマンド解析モジュールから渡されたコマンドを処理して、スライド操作や画面表示等のイベントを出力する。



(a) 対応方法要請メッセージフォーマット



(b) 対応方法通知メッセージフォーマット

図 7 対応方法の判定に使用するメッセージ

Fig. 7 Message format for judgment communication.

オートモードにおいて対応方法を取得するために、Sender+や Receiver+から送られる対応方法要請メッセージと、Broker が決定した対応方法を Sender+と Receiver+へ送る対応方法通知メッセージを新しく導入する。これら 2 つのメッセージフォーマットは、図 7 のようになっている。対応方法要請メッセージでは、Sender+ごとに一意に付けられる会議 ID とパスワード、Sender+であるか Receiver+であるかを示すポジション、介在するネットワーク障害物の種類、使用するポート番号が記されている。対応方法通知メッセージでは、決定された対応方法、その対応方法に必要な補助情報が記されている。補助情報については、対応手順に応じた情報として、Sender+あるいは Receiver+の IP アドレスやポート番号、Support あるいは Relay モジュールのポート番号等が格納されている。

なお、Receiver+が複数存在する場合は、上記の対応方法の判定を、Receiver+ 1 つずつについて順番に行っていく。得られた各 Receiver+との対応方法結果の一覧は Sender+で管理し、各 Receiver+に応じた対応方法で制御情報を送る。

4.2 設定画面の拡張

Broker を除く GOZARU+は、Windows 上での一般アプリケーションとして実装されており、ネットワーク障害物に対応するための方法を利用者が選べるような通信モードの設定を Sender+と Receiver+に可能とした。通信モードは 3 種類用意しており、1 つ目は今回拡張を行ったネットワーク障害物に応じて対応方法を選択するオートモードで、2 つ目は GOZARU 同様に直接受講者との通信を行うダイレクトモードで、3 つ目はつねにリレーサーバ (Broker) 経由となる Relaying モードである。

通信モードがオートモードの場合、Broker のホスト名あるいは IP アドレス、Broker のポート番号、STUN サーバのホスト名または IP アドレス、教材共有グループで同一の会議

ID とパスワードを, Sender+ と Receiver+ においてそれぞれ利用者が入力しなければならない. また, 会議 ID とパスワードを入力した後に, ID チェックボタンを押すことにより, 入力した会議 ID とパスワードが使用中であるかどうかを Broker から知らせてもらうことができる. 追加した通信モードや設定パラメータを入力するユーザインタフェース画面の 1 つを図 8 に示す.

今回, スライド共有をより容易にするために, Receiver+ で「スライドファイルの URL を自動取得」をチェックすると, Sender+ 側で設定したスライド URL を Broker 経由で受信し, Receiver+ 自身でその URL からスライドファイルを自動的にダウンロードし, スライドファイルを共有する機能も追加した.

4.3 開発環境

Sender+, Receiver+ の開発は, Microsoft Windows XP 上で行った. プログラム言語には, Microsoft Visual C# .NET 2005 を使用した. 補助サーバ上の Broker は, プログラム言語に C 言語を使用し, Linux 上のアプリケーションとして実装した.

Sender+ と Receiver+ は, Windows XP および Vista で動作し, 動作確認を行った PowerPoint のバージョンは, Microsoft Office 2000, XP, 2003 および 2007 である.

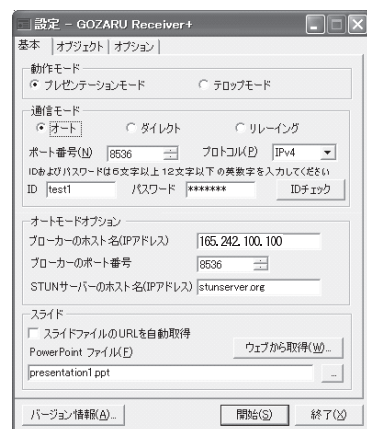


図 8 機能追加を行った設定画面の例

Fig. 8 A setting window on which additional functions are implemented.

5. 評価と考察

5.1 機能評価

5.1.1 動作検証

GOZARU+ が Sender+ と Receiver+ のインターネット接続に介在するネットワーク障害物について, 図 4(a) のような組合せ, すなわち $4 \times 4 = 16$ 通りの場合で動作するかについて調べた. 実験環境は図 9 で, インターネット上に Broker と STUN サーバを置き, それぞれ異なるネットワーク障害物の配下に Sender+ と Receiver+ が動作する PC を設置した. ファイアウォール配下からインターネット接続させたり, NAT を介在させたりする. このとき NAT には, Cone NAT や Symmetric NAT であるものを用意し, すべての組合せで教材の同期が行えるかを調査した. なお, Sender+ と Receiver+ の動作モードはプレゼンテーションモードで, 通信モードはオートモードとした. その結果, ネットワーク障害物のすべての組合せにおいて, Sender+ と Receiver+ 間の通信方法が事前に想定した図 4(a) の対応方法と一致し, また教材の同期も正常に行えることを確認した.

次に, 受信者の自宅での使用を想定し, 特にオートモードで簡単に使用できるかどうかを確認するために, フィールド評価テストを行った. この実験では, すべての場合を網羅できるわけではないが, IPv4 ISP に接続した NAT 配下の一般家庭や遠隔講義が行われる教育機関での利用を想定することで, 一定の指標が得られると考えられる.

広島市立大学と, 6 名の実験協力者の自宅および 1 名の実験協力者が宿泊したホテルの間

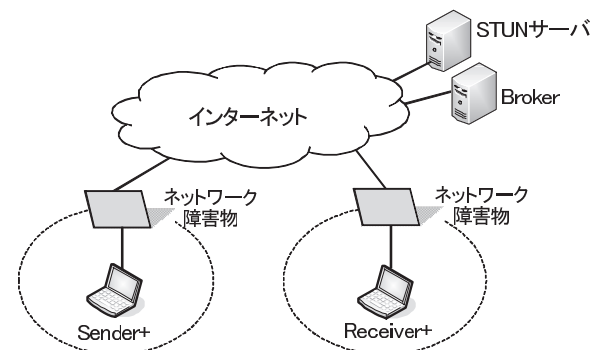


図 9 機能評価に使用した構成

Fig. 9 Configuration for the functional evaluation.

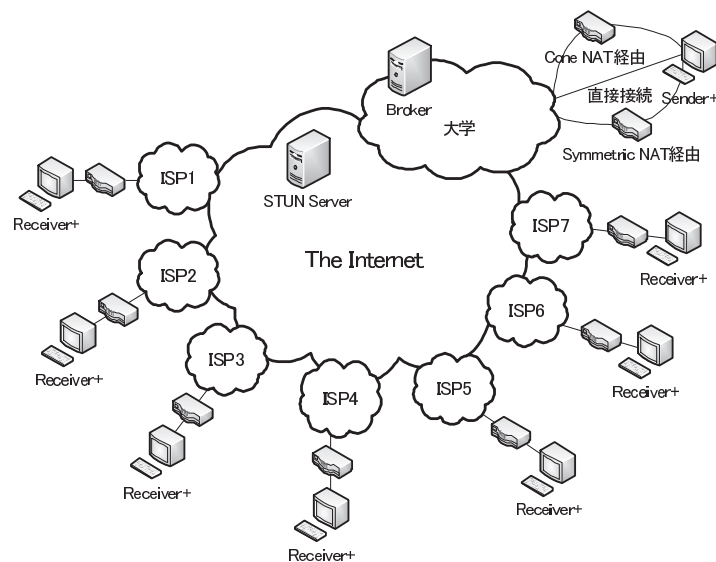


図 10 IPv4 ISP におけるフィールド評価の構成
Fig. 10 Field Experiments under IPv4 ISPs.

で、オートモードでの接続を確認した。大学側には Sender+ と Broker をそれぞれ別個の PC で動作させ、7 名の実験協力者は Receiver+ をそれぞれ動作させた。システム構成図を図 10 に示す。7 名の実験協力者が使用している ISP、インターネット接続に介在するファイアウォールの有無と NAT の種類をまとめたものを表 1 に示す。なお、Sender+ と Receiver+ の動作する PC は、すべて PowerPoint 2003 を使用し、その OS はすべて Windows XP Professional であった。

Sender+ を動作させる端末とインターネット間のネットワーク障害物として、図 4 (a) にあげた 2 種類の NAT を接続し、NAT なしの直接接続を含め 3 通りのテストを行った。その結果、オートモードにおいて、Sender+ の教材が、すべての Receiver+ を起動している被験者端末で、実験協力者が ISP の違いを意識することなく簡単に教材の共有ができることを確認した。このときの Sender+ と Receiver+ の間での対応方法の判定結果は表 2 のようになり、図 4 (a) の対応方法の組合せのとおり正しく対応方法の判定が行われていることを確認した。

表 1 フィールド評価時のネットワーク環境

Table 1 Network environments in the field experiments.

	ISP	ファイアウォールの有無	NAT の種類
ISP1	MEGA EGG	NAT で兼用	Port Restricted Cone NAT
ISP2	OCN	NAT で兼用	Port Restricted Cone NAT
ISP3	OCN	NAT で兼用	Symmetric NAT
ISP4	OCN	NAT で兼用	Port Restricted Cone NAT
ISP5	Yahoo!BB	NAT で兼用	Full Cone NAT
ISP6	DION	NAT で兼用	Port Restricted Cone NAT
ISP7	愛・ネット	NAT で兼用	Port Restricted Cone NAT

表 2 Sender+ と Receiver+ の間での対応方法の判定結果

Table 2 Judgment results between a Sender+ and the Receiver+.

	Sender+側のネットワーク障害物の種類		
	NAT なし	Cone NAT	Symmetric NAT
ISP1	Receiver+から接続	UDP Hole Punching	Relaying
ISP2	Receiver+から接続	UDP Hole Punching	Relaying
ISP3	Receiver+から接続	Relaying	Relaying
ISP4	Receiver+から接続	UDP Hole Punching	Relaying
ISP5	Receiver+から接続	UDP Hole Punching	Relaying
ISP6	Receiver+から接続	UDP Hole Punching	Relaying
ISP7	Receiver+から接続	UDP Hole Punching	Relaying

5.2 Broker の性能評価

Relay モジュールが多数動作する Broker は、通信が集中することから、単一故障点やボトルネックになってしまう可能性がある。冗長化と負荷分散については、TCP/UDP のサーバにおける一般的な手法が適用できる。ネットワーク負荷について大学 4 拠点での講義の際に測定を行ったところ、1 拠点あたり平均 0.5 kbps、ピーク時で 2 kbps であった。

次に、Broker の処理限界数を見積もるために、PC クラスタ計算機を利用し、受信者に相当する Receiver+ プログラムの数を 10 から 1,000 台まで変化させ、Broker Relay モジュールでの平均処理時間を計測した。実験の構成を図 11 に示す。クラスタ計算機全体で動作させるプログラムは、1 個の Broker Relay モジュール、1 個の仮想 Sender+ プログラム、複数の仮想 Receiver+ プログラムとなる。仮想 Sender+ プログラムは、Broker Relay モジュールに 0.1 秒間隔で 15 kbps 相当のパケットを送り続ける。15 kbps とは、Sender+ で 1 度に送信される最大の帯域である。仮想 Receiver+ プログラムは、Broker Relay モジュールから中継されたパケットを受信し続け、一定間隔で受信したパケットの平均帯域を表示する。

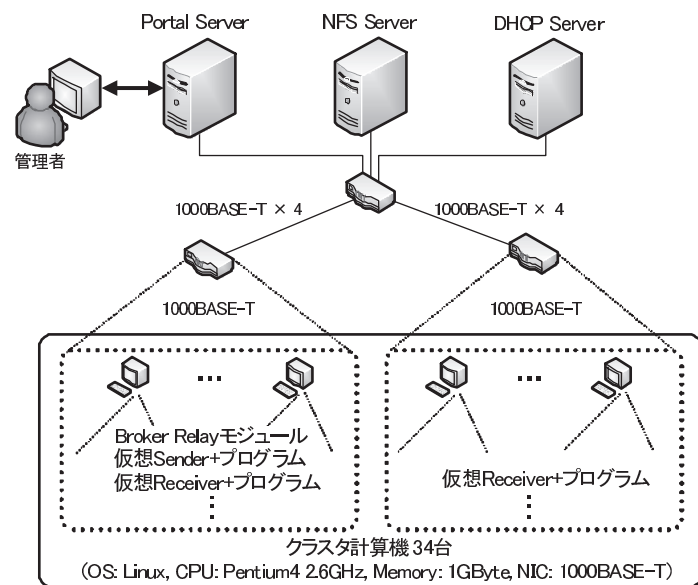


図 11 Broker の性能評価に使用した構成

Fig. 11 Configuration for the performance evaluation of Broker.

Broker Relay モジュールは、仮想 Sender+からパケットを受信し、接続している全仮想 Receiver+へ送信するまでの処理時間の平均を一定間隔で記録する。また、Broker Relay モジュールを起動している計算機では、CPU 負荷も計測した。

測定結果を図 12 に示す。受信者数に比例して遅延は大きくなり、受信者が 1,000 台のときの処理時間は 10 ミリ秒以下となっており、このとき Broker が動作する計算機の CPU 負荷は 10%以下であった。遠隔講義という特性上、受信者の数は数百台程度を最大と想定している。このような想定のもと、GOZARU+を同時使用したときの処理遅延は、インターネット経由でのネットワーク遅延と比較して、実用上、十分に小さい時間に収まることが期待できる。

5.3 大学の遠隔講義によるフィールド評価

広島市立大学、慶應義塾大学、京都大学、キャンパスプラザ京都との 4 拠点合同で行われている合同遠隔講義において、Relaying モードのフィールド評価テストを行った。Relaying モードを使用した理由は、この 4 拠点では IPv4 専用ネットワークと IPv6 専用ネットワー

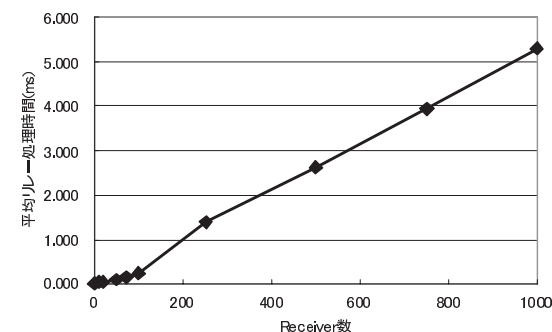


図 12 受信者数と Broker Relay モジュールの平均処理時間の関係

Fig. 12 Relation between the number of terminals and average processing time of relaying.

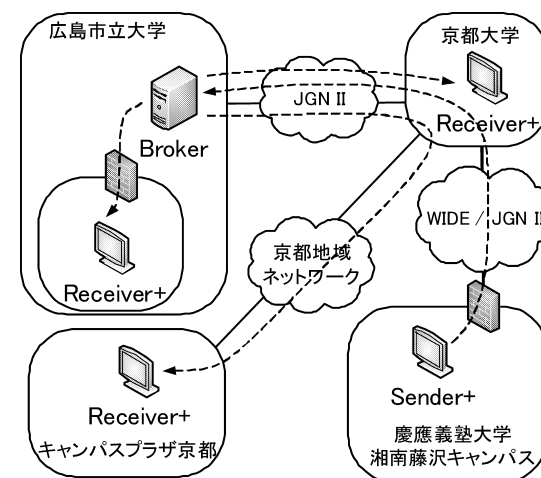


図 13 遠隔講義のネットワーク構成

Fig. 13 Network configuration of remote lecture.

クの混在が可能であり、それらの間でのリレーサーバの効果を確認するためであった。遠隔講義のネットワーク構成を図 13 に示す。図中の矢印は教材の同期のためのデータの流れを示している。

評価テストを行った遠隔講義では、慶應義塾大学の講演を他の 3 拠点へ中継する形であり、講演者の PC に Sender+を導入し、スライドの操作を行ってもらった。また、他の 3

表 3 類似システムとの比較
Table 3 Comparison of similar systems.

		GOZARU+	RPT	Mppt	Live Meeting
対応通信 方式	IP ユニキャスト対応	IPv4 および IPv6	IPv4 のみ	×	(*1)
	IP マルチキャスト対応	IPv4 および IPv6	×	IPv4 のみ	(*1)
	NAT Traversal 対応	○	○	×	○
	IPv4/IPv6 混在環境への対応	○	×	×	(*1)

*1 Live Meeting サービスは IPv4 および IPv6 の両方に対応しているが、Office Communications Server ソフトウェアは IPv6 には対応していない。

拠点の受講者用 PC に Receiver+を導入しプロジェクタを用いて講義室内にスクリーンで投影し、同期したスライドを表示した。広島市立大学内のネットワークに Broker を単体で起動し、リレーサーバとして使用した。

その結果、すべての遠隔講義について問題なく教材を共有することができた。また、Receiver+側で受信した制御情報の帯域と、Broker Relay モジュールでの中継処理に要する時間についても調べた。受信した制御情報の平均帯域は 0.477 kbps で、最大受信帯域は 2.12 kbps であった。中継処理に要した平均処理時間は 0.044 ms で、最大処理時間は 0.088 ms であった。

また、IPv4/v6 両対応の Broker を使用することで、送信者が IPv4 を使用し、かつ受信者が IPv6 しか利用できないような環境下においても、おたがいの教材のプレゼンテーション同期が可能になることも確認した。

5.4 機能比較

GOZARU+と類似システムとの機能比較を行った。比較に用いたシステムは、2.2 節で述べた 3 つのシステムである。表 3 に、ネットワーク機能に関する比較を行った結果を示す。GOZARU+では、従来システムが対応していなかった、NAT やファイアウォールへの対応、IPv4 と IPv6 の混在環境への対応を実現できた。なお、Live Meeting サービスは有償であり、年間のライセンス費用は 300 ユーザのときで約 260 万円¹²⁾と比較的高額である。

5.5 複数の通信モードの提供

GOZARU+のオートモードでは、3.3 節で述べたような複数の対応方法を試みることで、ネットワーク障害物への対応を行っているが、現実には Relaying を使用するケースが多いと想定される。Relaying における懸念事項である Broker のスケーラビリティについては、5.2 節で評価を行い問題ないことが分かっており、Relaying の機能だけを提供すれば十分ではないかという考えもある。しかしながら、Relaying においては、Broker の負荷だけでなく、つねにサーバを経由することによるネットワークにおける遅延やトラフィックの増大、

耐障害性の低下も危惧される。したがって、GOZARU+では Relaying 以外の方法で直接通信できる場合にはそれを優先し、また手動設定にも対応できる等、利用者が運用時に対応方法を選択できるような実装としている。

6. おわりに

端末に介在するネットワーク障害物に応じて、ネットワーク障害物対応方法を選択するプロトコルを遠隔プレゼンテーションシステム GOZARU に搭載することにより、様々な環境で動作することができる遠隔プレゼンテーションシステム GOZARU+を開発した。講演者と受講者の介在するネットワーク障害物に関してすべての組合せで、教材が同期できることを確認した。また、IPv6 と IPv4 のいずれかしか使えない環境でもプレゼンテーション教材のプレゼンテーション同期を可能にした。新規に導入した Broker サーバの 1 中継あたりの負荷は低く、大規模展開における追加コストも低く抑えられることが期待できる。

GOZARU+のフィールド評価テストでは、自宅やホテルといった環境でも使用できることを確認し、また、実際に行われている遠隔講義で使用することで、安定して動作することを確認した。これらの評価や実際の遠隔講義での運用により、開発した GOZARU+は、課題であるネットワークの利用制限下におけるプレゼンテーション同期の 1 つの解決ツールとしての有用性を示した。

なお、本論文では IPv4 の NAT に代表されるネットワーク障害物への対応を中心に述べたが、IPv6 ネットワークにおけるファイアウォールの配下やグローバルな接続性を持たない IPv6 ネットワークの配下に GOZARU+が設置された場合においても、今回の手法で同様に対応できることが期待できる。

謝辞 合同遠隔講義の実施にあたって、中村素典氏、大川恵子氏、北村俊明氏、ならびに関係するスタッフの諸氏のご協力に感謝いたします。

参考文献

- 1) 独立行政法人メディア教育開発センター：インターネット等を用いた遠隔教育，e ラーニング等の ICT を活用した教育に関する調査報告書（2008 年度）（オンライン），pp.46-47 (2009).
- 2) 櫻田武嗣，萩原洋一：全国 18 国立大学法人を結ぶ HD 対応遠隔講義システムの設計，情報処理学会研究報告，2009-IOT-4(16)，Vol.2009, No.21, pp.91-95 (2009).
- 3) 前田香織，中村素典，大川恵子，北村俊明，井上博之：広帯域ネットワークを用いた大学間授業コラボレーションの実践，電子情報通信学会総合大会講演論文集，pp.SS-5-SS-6

- (2008).
- 4) Maeda, K., Matsuura, T., Kohno, E. and Kishida, T.: Design and Implementation of a Telepresentation System for Sharing Lecture Material in Distributed Learning Environment, *The Journal of Information and Systems in Education*, Vol.5, No.1, pp.94-103 (2007).
 - 5) Egevang, K. and Francis, P.: The IP Network Address Translator (NAT), IETF, RFC1631 (1994).
 - 6) 岸田崇志, 前田香織, 河野英太郎: ネットワーク障害物を乗り越えるテレビ会議用ゲートウェイの開発, *情報処理学会論文誌*, Vol.48, No.4, pp.1552-1561 (2007).
 - 7) Ford, B., Srisuresh, P. and Kegel, D.: Peer-to-peer communications across network address translations, *Proc. 2005 USENIX Annual Technical Conference*, USENIX, pp.179-191 (2005).
 - 8) UPnP Forum: UPnP Device Architecture 1.0 (online) (2008).
<http://www.upnp.org/specs/arch/UPnP-arch-DeviceArchitecture-v1.0.pdf>
 - 9) Rosenberg, J., Weinberger, J., Huitema, C. and Mahy, R.: STUN – Simple Traversal of User Datagram Protocol (UDP) Through Network Address Translators (NATs), IETF, RFC3489 (2003).
 - 10) 小川浩司, 櫻井智明, 大川恵子, 村井 純: インターネットを利用したリアルタイム中継における資料共有システムの設計と実装, *情報処理学会第 61 回全国大会講演論文集 (4)*, pp.285-286 (2000).
 - 11) Gemmell, J., Schooler, E. and Kermode, R.: A scalable multicast architecture for one-to-many telepresentations, *IEEE International Conference on Multimedia Computing Systems (ICMC'98)*, pp.128-139 (1998).
 - 12) Microsoft Corporation: Live Meeting ホームページ – Microsoft Office Online (オンライン). <http://office.microsoft.com/ja-jp/livemeeting/> (参照 2009-09-10)
 - 13) Oikarinen, J. and Reed, D.: Internet Relay Chat Protocol, IETF, RFC1459 (1993).
 - 14) Kalt, C.: Internet Relay Chat: Server Protocol, IETF, RFC2813 (2000).
 - 15) Baset, S.A. and Schulzrinne, H.: An Analysis of the Skype Peer-to-Peer Internet Telephony Protocol, *IEEE INFOCOM 2006* (2006).

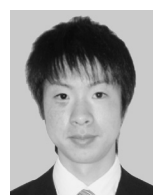
(平成 21 年 6 月 15 日受付)

(平成 21 年 12 月 17 日採録)



井上 博之 (正会員)

1987 年大阪大学工学部電子工学科卒業。1989 年同大学大学院修士課程修了。同年住友電気工業株式会社入社。1998 年奈良先端大学院大学博士後期課程修了。2000 年株式会社株式会社インターネット総合研究所入社。2004 年株式会社 IRI コピテック (現, 株式会社コピテック) 転籍。2007 年広島市立大学大学院情報科学研究科講師。現在に至る。インターネットアーキテクチャ, 移動体通信に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



日山 雅之

2008 年広島市立大学情報科学部情報メディア工学科卒業。現在, 長岡技術科学大学大学院工学研究科修士課程在学中。遠隔プレゼンテーションシステムや高精度時刻同期に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



近堂 徹 (正会員)

2001 年広島大学工学部第二類 (電気系) 卒業。2003 年同大学大学院工学研究科博士課程前期修了。2006 年同大学院工学研究科博士課程後期修了。現在, 広島大学情報メディア教育研究センター助教。博士 (工学)。IP ネットワーク上でのリアルタイムマルチメディア通信, ネットワークコンピューティング技術等の研究に従事。電子情報通信学会会員。



前田 香織 (正会員)

1982 年広島大学総合科学部卒業。同大学工学部助手, (財) 放射線影響研究所技術員, 広島市立大学情報科学部助手, 同大学情報処理センター助教授を経て, 現在, 同大学大学院情報科学研究科教授。博士 (情報工学)。コンピュータネットワーク, マルチメディア情報通信に関する研究に従事。電子情報通信学会, 教育システム情報学会各会員。