

複数の異種規格 LAN における QoS を考慮した マルチメディア通信システム

杉本龍[†] 柴田義孝[†]

日本の国土の約 6 割は中山間地域であり、そのような場所で災害が発生した場合、既存の通信インフラが利用できず集落が孤立してしまう恐れがある。本研究では、中山間地域住民の安心・安全のためのインフラを確保するため、無線をベースとした頑強で迅速に復旧可能な災害情報ネットワークを構築する。また、構築された災害情報ネットワーク上で動作する QoS を考慮したマルチメディア通信システムも構築する。そして、インフラの構築ではより強い頑強性を確保するため、通信環境に応じて動的に通信方式や周波数を切り替えて最適な通信経路を確保する仕組みを取り入れたシステムを実装しその有用性を検討する。さらに、マルチメディア通信システムでは刻々と変化する通信環境とエンドユーザの要求を考慮するための仕組みを取り入れた機能を実装し、その有用性を検討していく。

Multimedia Communication System

Considering QoS on the Heterogeneous LANs

RYO SUGIMOTO[†] YOSHITAKA SHIBATA[†]

About 60 percent of the country in Japan is an intermediate and mountainous area. An existing communication infrastructure cannot be used in those areas and the village is isolated when the disaster occurs in such a place. The disaster information network that can restore it stubbornly and promptly based on the wireless is constructed to secure the infrastructure for intermediate and mountainous area resident's disaster for safety and safety. By the same token, we build the multimedia communication system considering QoS on this network. This network system that takes the mechanism that the communication method and the frequency are dynamically switched depending on the communication environment and the best communication route is mounted. We implement the system which considers heterogeneous network and the demand of the end user by this multimedia communication system, and examine the usefulness.

1. はじめに

近年無線通信技術の発展により、公衆無線 LAN や災害情報ネットワークなど様々なアプリケーション分野で無線技術が利用されるようになってきた。特に、災害時通信において無線通信システムは非常に重要な役割を担う。我々はこれまで、IEEE 802.11 b, g, j のような製品化された無線 LAN システムを利用して、可用性と耐故障性に優れた災害情報ネットワークを構築し検証を行ってきた[1]。これらのネットワークは、標準的なネットワーク設定の無線 LAN によって成り立っている。しかしながらこれらのネットワーク全体の接続性は、ノード間の距離や送信出力、使用周波数帯、移動速度に依存するため、接続を確立できるかどうかは周囲の環境に依存する。そこで、我々は通信環境に応じて動的に通信方式や周波数を切り替えて最適な通信経路で通信できるインフラの構築を行ってきた[2]。しかしながら、そのインフラ上で既存のメディア通信システムを動作させてもメディアの品質が保たれるとは限らない。そのため、構築してきたインフラ上でメディアの QoS 制御をするシステムが必要とされる。

本稿では、IEEE802.11b, g, j や WiMAX, 携帯電話網などの特徴の異なる無線通信技術を、ノード間の距離や送信出力、使用周波数帯、移動速度などのネットワーク性能等の通信環境の変化に基づいて適切に切り替えて利用する。固定基地局と移動基地局を協動的に利用することで、災害情報ネットワークを構成する。ノード間には複数の選択可能なリンクが存在し、それらはノード間の距離や送信出力、使用周波数帯等に基づいて、リンク切り替えの候補となる。また、ユーザは上記で述べたネットワークを通して災害情報をやり取りする際、本システムへメディアに対する大まかな要求を伝えることで、インフラシステム側にユーザ要求が伝えられ、ネットワーク性能等の通信環境に加え、ユーザ要求を考慮したリンクが選択される。そして、本システムでは選択されたリンクでユーザ要求を最大限満たすメディアを選択する。そうすることで、ネットワークインフラの一部でネットワークの障害が起きた場合でも、通信を続けることが可能となり、その時々通信状況においてユーザ要求を通信状況が許す限り満たしたメディア通信が可能となる。我々は、複数の異種規格無線ネットワークを適応的に利用したアドホックネットワークを設計・実装し、構築したシステムを用いて通信インフラシステムの機能と性能を評価した。さらに、その通信インフラシステム上で QoS を考慮したマルチメディア通信システムを設計・実装し、構築したシステムを用いて本システムの機能と性能を評価する。

[†]岩手県立大学大学院ソフトウェア情報学研究所
Iwate Prefectural University, Japan

2. 災害情報

過去の大規模自然災害の調査により、災害発生前と後において要求される情報の種類は、表1に示すとおりであるということがわかっている。災害発生前においては、防災情報や災害予測情報が必要とされ、災害発生後においては、安否情報や災害の動向、被害状況が求められる。表1において、 t_1 は通常時、 t_2 は災害予測時を表し、ここで必要とされるのは主に防災に関する情報や避難経路や避難場所などの情報である。

t_x は災害発生時を表し、通信機器や電源等が損傷する恐れがあるのもこのタイミングである。 t_3 は災害発生直後を表し、ここでは避難に関する情報とともに、知人の安否確認や被災地の状況などが求められる。 t_4 は災害沈静化後を表し、交通情報や救援物資、ライフラインの状況等の情報が求められるようになってくる。 t_5 は復旧期初期であり、 t_6 は t_5 以降の復旧期である。

対象	要求項目\時期	t_1	t_2	t_x	t_3	t_4	t_5	t_6
被災者	防災情報	△	○					
	避難情報		○		◎			
	安否情報				◎	◎	○	△
	被災状況				◎	◎	◎	
	交通情報				○	◎	◎	
	救援物資供給状況					◎	◎	
	サービス情報					◎	◎	
	ライフライン状況					◎	◎	
支援者・親族	行政情報				◎	◎	◎	
	安否情報				◎	◎	○	
	被災状況				◎	◎	△	
	救援物資供給状況					◎	◎	

表1 刻々と変化する要求される災害情報

Table 1 Required Disaster Information

災害発生直後において通信ネットワークに障害が起こることは十分に考えられるため、できるだけ迅速に再構築しなければならないが、再構築するネットワークに要求されるスループットは、発生直後では小さく、時間がたつにつれて徐々に増加していく傾向にある。

3. 関連研究と研究目的

3.1 関連・先行研究の問題点

無線 LAN システムを利用した災害情報ネットワークの構築事例として、山古志ねつと共同実験プロジェクト[3]がある。これは、平成16年の新潟県中越地震を契機に開始されたプロジェクトであり、KDDI 提供の 5GHz 帯を使用した高速無線アクセスシステムと、IEEE802.11g の無線 LAN を組み合わせて図1のようなアドホックメッシュネットワークを構築する事で、中山間地域に点在する集落をカバーすることを目的としている。

しかしながら、山古志ねつとではメッシュネットワークの部分に単一規格の無線システムのみを利用するにとどまっており、中山間地域の災害地においてそのようなネットワークは、無線 LAN システムの電波の直進性等の理由から外部の通信環境の変化に対応しにくく、また QoS 制御や電力制御を柔軟に行う余地がないという問題点がある。

我々はこれまで、このような問題点を解決するために、複数の異種規格無線 LAN を選択的に利用して冗長的なネットワークを構築するシステムの研究[2]を行ってきた。この研究の目的は、被災地における通信環境を認知しながら複数の異種規格無線 LAN を選択的に利用することで迅速に最適なネットワークを再構築するシステムの開発である。このシステムを開発するために必要な機能は以下の2つ。

1. 外部通信環境の変化に対応するための機能
 - (ア) 外部通信環境の影響によりリンク品質が変化したことを察知する機能
 - (イ) 検出したリンク品質に基づき最適なリンクへ切り替える手法の開発
2. QoS 制御や電力制御を柔軟に行う機能
 - (ア) ネットワークに対する QoS 要求を受け付けるインターフェースの導入
 - (イ) 入力された QoS 要求を満たす最適な通信経路選択手法の開発

この先行研究では、ネットワークの再構築に重点を置いていたため、再構築前のネットワークで正常に動作していたメディア通信システムであっても、ネットワークが再構築された際、メディアの品質を維持できなく再構築されたネットワークに適したメディア品質を選択する必要性が出てくるという問題点がある。このような問題点を解決するため、動的に再構成されるネットワークにおける QoS を考慮したメディア通信システムが必要であると言える。

3.2 研究目的

本研究の目的は、ネットワーク状況の変化に対応してメディア品質と種類を選択的に決定し、決定されたメディア品質と種類で通信を行うことによって、複数の異種規格

無線 LAN における QoS を考慮したメディア通信システムの開発である。このシステムの主な機能は以下のようになる。

1. ユーザ要求を通信インフラシステムへ伝える機能
2. ユーザ要求とネットワーク状態から、最適なメディア品質と種類を選択する機能
3. 選択されたメディア品質と種類で通信をする機能
4. 通信インフラシステムによって構築されたネットワーク状態の変化を察知する機能
5. ネットワーク状態の変化を察知に合わせてメディア品質と種類を再選択する機能

4. システム構成

4.1 通信インフラシステムの概要

本研究で用いる通信インフラシステムは図 1 で示されるように、複数の異種規格無線 LAN デバイスを収容したルータ PC と、ユーザとの接続用無線アクセスポイント、そしてそれを搭載する車両で構成されるモバイルルータによって災害情報ネットワークを構成する。

隣接ノード間は、複数存在する無線 LAN デバイスのアドホックネットワークで相互に接続される。隣接ノード間における複数の選択可能なリンクの中から、現在のノード間の距離や送信出力、使用周波数帯や実効スループット等に基づいて最適なリンクを選択することで、より優れたコネクティビティの確保が可能となる。また、エンド間はマルチホップのメッシュネットワークで構成されるため、通信経路の候補は複数存在する。

本システムでは、エンド間の実効スループットやパケットロス率、ラウンドトリップ時間等のネットワーク性能を常に監視し、それらの変化とユーザの要求に応じて最適な経路を算出し、利用する。これにより、実際のネットワーク性能に応じて最適な経路を選択し続けると同時に、例えば VoIP や Video ストリームなど遅延時間の重要なアプリケーションでは遅延時間の小さい経路を選択するといったような、ユーザ要求に応じた QoS 制御を実現することが可能となる。

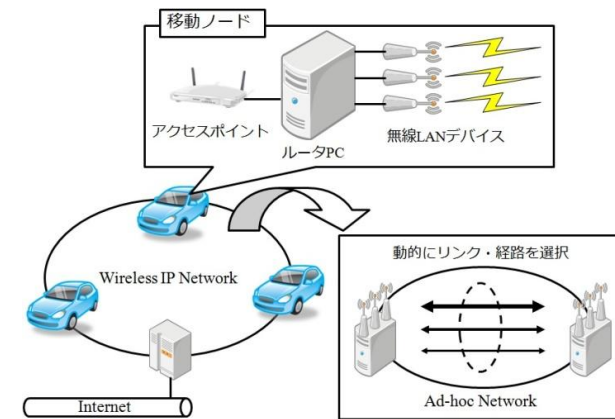


図 1 通信インフラシステム概要図

Figure 1 Communication Infrastructure System Configuration

4.2 本システムの概要

図 2 に本システムの概要図を示しており、エンドユーザ間で、保証された品質のマルチメディアの通信を実現するために、現在のネットワーク状況とユーザの要求から保証可能なメディアを後述する AHP 法を拡張したアルゴリズムを用いて選択する。そして、エンドユーザの移動環境下では刻々とネットワーク状況が変化するため、その変化に合わせてメディアの品質を再選択することにより、動的にメディアの品質を変更する。

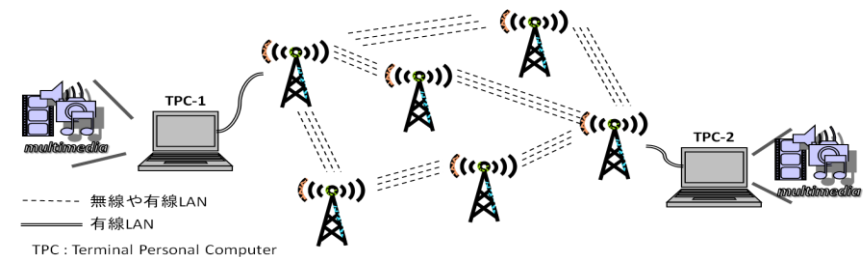


図 2 システム概要図

Figure 2 System Configuration

本システムでは、エンド間のネットワーク構築に関しては[2]で述べられている通信インフラシステムの COBRA System(COst Based Routing Assist System)を用いている。そのため、本システムで利用するエンド間の実行スループットやパケットロス率、ラウンドトリップタイム時間等のネットワーク性能のパラメータは COBRA System を監視し、取得する。

4.3 メディア選択アルゴリズム

本研究の提案手法において、メディアを選択するためには、ネットワーク状態を把握するためのパラメータと、ユーザからの要求を把握している必要がある。まず、ネットワークパラメータは、エンド間の実効スループットやパケットロス率、ラウンドトリップ時間等の値。また、ネットワークパラメータとユーザ要求のどちらに重みを置くのか、音声と映像の通信のどちらに重みを置くのか、そして、音声や映像の品質に関する簡単な問い合わせをユーザに行い、その回答としてクラス分けされたそれぞれの値がユーザの要求となる。それらの値を AHP 法と呼ばれる意思決定法をベースにしたアルゴリズムを用いてメディアを選択する。具体的なアルゴリズムは大きく分けて以下の 5 つである。

1. パラメータの取得
2. AHP 法を用いた最適なメディア品質と種類を選択するための計算
3. メディア品質表の作成
4. 2. から 3. に対応するメディア品質を決定
5. ネットワークパラメータの変化に合わせてメディア品質を再決定する
 1. のパラメータは主に、ネットワーク状況を把握するためにパラメータとユーザ要求を把握するためにパラメータの 2 つがある。まず、ネットワーク状況を把握するためのパラメータは、本システムが COBRA System から取得する。そして、ユーザ要求を把握するためのパラメータはまず、以下の 4 つをユーザに問う。
 - ・ ネットワークパラメータ優先かユーザ要求優先かの項目
「ネットワークパラメータ優先 1 2 3 4 5 6 7 8 9 ユーザ要求優先」
 - ・ 映像優先か音声優先かの項目
「映像優先 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 音声優先」
 - ・ 映像に関する優先項目
「画質優先 1/9 1/8 1/7 1/6 1/5 1/4 1/3 1/2 1 2 3 4 5 6 7 8 9 フレームレート優先」
 - ・ 音声に関する優先項目

「量子化ビット数優先 1/9 1/8 1/7 1/6 1/5 1/4 1/3 1/2 1 2 3 4 5 6 7 8 9 サンプリング周波数優先」

上記項目の数値をユーザに選択してもらい、その値がパラメータとなる。

次に、2. の AHP 法を用いた最適なメディア品質と種類を選択するための計算方法を説明する。まず、ネットワークパラメータの優先度を求めることから始まる。ネットワークパラメータの優先度は、[4]で述べられている方法を利用することにより求めることができる。さらに、求めた優先度から映像と音声の総合値を[4]で述べられている方法を用いて求める。それぞれの値を NVV と NAV とする。続いて、求めた NVV と NAV における映像と音声の比率(NV と NA)をそれぞれ求める。次に、ユーザ要求の「映像優先か音声優先かの項目」からユーザ要求における映像と音声の比率(UV と UA)をそれぞれ求める。さらに、ユーザ要求の「ネットワークパラメータ優先かユーザ優先かの項目」からネットワークパラメータとユーザ要求の比率(NR と UR)をそれぞれ求める。そして、以上の求められた各値から以下の式を用いて映像と音声の重要度(VW と AW)をそれぞれ求める。

式 1 : 映像の重要度

$$VW = NV \times NR + UV \times UR$$

式 2 : 音声の重要度

$$AW = NA \times NR + UA \times UR$$

最後に、以上で求めた VW と AW の値、さらに、ユーザ要求の「映像に関する優先項目」と「音声に関する優先項目」の値(UVV と UAV)から表 2 に示す一対比較表を作成する。さらに、作成した一対比較表を行列として、その行列の最大固有値と固有ベクトルを求め、その固有ベクトルを各メディア品質項目の優先度とする。

	画質	フレームレート	量子化ビット数	サンプリング周波数
画質	1	1 / UVV	VW / AW	VW / AW
フレームレート	UVV	1	VW / AW	VW / AW
量子化ビット数	AW / VW	AW / VW	1	1 / UAV
サンプリング周波	AW / VW	AW / VW	UAV	1

表 2 各メディア品質項目に対する一対比較表

Table 2

3. メディア品質表の作成は、縦の項目をメディアのビットレートでレベル分けし、横の項目は各メディア品質の項目をレベル分けする。たとえば映像の横項目であれば、

画質とフレームレートで2極化し、画質はきれいだがフレームレートが低いレベルから徐々に画質はよくないがフレームレートが高いレベルへと変わっていくように設定する。このようにして、映像と音声でそれぞれの品質表を作成する。

続いて、4. の2. から3. に対応するメディア品質を決定方法について説明する。初めに、2. で求めた VW と AW を一桁の整数で正規化する。そして、その差分だけ3. で作成した映像と音声の品質表を縦にずらし重ね合わせる。そして、現在のネットワークの実行スループットに見合った縦方向のレベルを選択する。次に2. で求めた各メディア品質項目の優先度を映像と音声の項目に分けて、それぞれの比率を求める。そして、その比率に見合う各メディア品質表の横の項目のレベルを決定する。このようにして、メディア品質と種類を決定する。

最後に、5. のネットワークパラメータの変化に合わせてメディア品質を再決定する方法について説明する。本システムは通信インフラシステムを常に監視し、ネットワーク状態が変化したことを検知する。そしてネットワーク状態の変化を検知したら、その時のネットワークパラメータを用いて2. の計算をし、4. の方法でメディアを再選択する。これを繰り返すことによって、ネットワークの変化に合わせて適宜メディア品質を選択することが可能となる。

5. システムアーキテクチャ

本システムアーキテクチャは図3で示す通り、Network Managing と Media Quality Control, Media Conversion, Media Communication からなる。また、図4. は流れがわかりやすいように COBRA System のアーキテクチャも一緒にしたものである。COBRA System は3つの層からなっており、各層の機能概要は以下に示す通りである。

- Network Layer : 拡張 AODV に基づいたルーティング
- Network Monitoring Layer : ネットワークの監視と性能値の取得
- Network Configuration Layer : Extended AHP によるリンク選択と Extended AODV による経路選択

そして、以上のような機能を有した COBRA System 上で動作する本システムの機能概要は以下の通りである。

- Network Managing
 - ユーザ要求を COBRA System が理解出来る値に変更と伝送
 - COBRA System が取得したネットワーク性能値の監視と取得
- Media Quality Control
 - ユーザ要求と Network Managing が取得したネットワーク性能値から最適なメディア品質と種類を選択する

- ネットワーク性能値が変化したら最適なメディア品質と種類を再選択する
- Media Conversion
 - 選択されたメディア品質と種類にメディアを変換
- Media Communication
 - メディア通信を行う

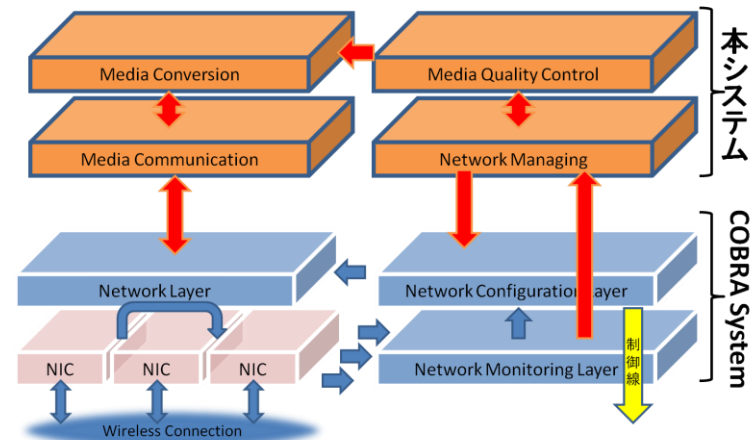


図3 システムアーキテクチャ
Figure 3 System Architecture

5.1 システムの流れ

本システムの全体データフローを図4に示す。実際に流れるデータは、送信側の本システムから COBRA System に伝えられネットワークを介して受信側の本システムへと伝わる。しかし、ユーザはそういったデータの流れを気にすることなく本システム間でデータのやり取りを行う。

詳細な本システムの流れは以下の4つのフェーズからなる。

- Connection phase
 - 本システムから、ユーザ要求を COBRA System に伝え、COBRA System がネットワークを構築するまでの流れ
- Media accept phase
 - ユーザ要求とネットワーク状態からメディア品質と種類を選択する流れ
 - 選択された品質と種類でメディアを作成する流れ

- Media transmission phase
 - 受信側からメディアの要求がされ、メディア通信を開始する流れ
- Change in network phase
 - ネットワーク状態が変化したときの流れ

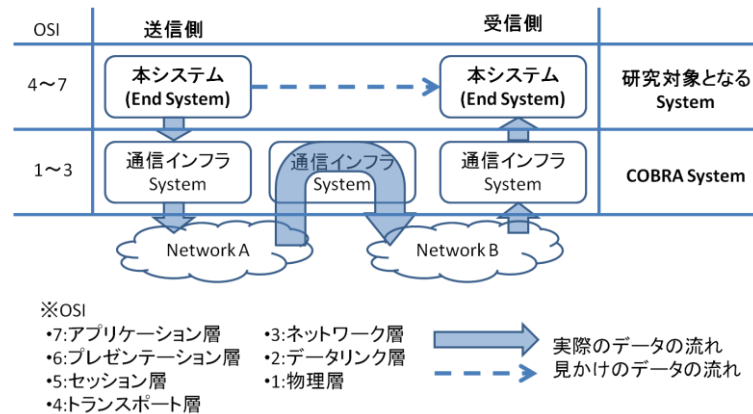


図4 全体のデータフロー
 Figure 4 Overall data flow

Connection phase では、初めユーザ要求を取得して、そのユーザ要求を COBRA System 側が受け入れられる形式に変更後 COBRA System に伝える。そして、COBRA System はユーザ要求に見合った経路を選択し、OSPF のメトリック値を書き換えることによってネットワークの構築がなされる。Media accept phase では、本システムが COBRA System からネットワークパラメータを取得し、そのネットワークパラメータとユーザ要求からメディア品質と種類を選択する。そして、選択されたメディア品質と種類でメディアの作成を行う。Media transmission phase では、受信側の本システムから送信側の本システムへ受信要求がされ、前のフェーズで作成しているメディアで通信を開始する。ここまでで、現在のネットワークに見合ったメディア品質と種類でメディア通信を行うことができる。しかしながら、ネットワーク状態は常に同じではなく時間と共に刻々と変化する。そこで Change in network phase でそのネットワーク変化に対応している。Change in network phase では、本システムが COBRA System から得られるネットワークパラメータの値を常に監視しているので、ネットワークパラメータの変化があれば変化後のネットワークパラメータと、最初に得ていたユーザ要求からメディア品質と種類を再選択する。そして、そのメディア品質と種類にメディア

を変更する旨を送信側の本システムから受信側の本システムへと伝えられる。最後に、Media accept phase と Media transmission phase と同様の処理される。このようにして、ネットワーク状態が変化したとしても、その変化に合わせてメディア品質と種類を変化することができる

6. プロトタイプシステム

プロトタイプシステム案を図5に示す。これまで COBRA System はデスクトップ PC を含めた構成で、移動局側で電力不足などが考えられた。実際、COBRA System の性能評価実験時に本システムが動作するノート PC を使用した場合、電力が不安定になった。そのため、電力供給量や可搬性を考えた結果、全てでノート PC の利用を検討している。また、本システムの実験を簡単に行うために無線 LAN デバイスは Buffalo 製の WLI-UCGNHP という小型のデバイスを検討している。そして、通信規格の制限を行うことで、デバイスごとで違いを出そうと検討をしている。

6.1 本システムのメディア切り替え動作の評価実験

今回の評価実験は「利用可能帯域の変化に対するメディア切り替えの追従性」を評価した。しかしながら、評価実験を実施する時点で COBRA System との連動がうまく取れないという不具合が見られたため、今回は端末 PC 間のみの有線環境で実装評価を行った。また本システムの開発において映像通信を優先したため、音声の切り替えをするメソッドが不完全であった。そのため、今回は映像のみの通信を行った。

ネットワーク状態の変化を擬似的に起こすため Traffic Management Controller[5]という、既存のソフトウェアを利用した。また、今回ネットワークパラメータに電界強度、RTT、スループット、パケットロス率を考慮した。しかしながら、Traffic Management Controller だけではネットワークパラメータの値をすべて変更することができないので、COBRA System の今までの性能実験結果から得られた値を参照した。そして、利用帯域を測定するため、TCP Monitor Plus[5]という既存のソフトウェアを利用し、利用可能帯域が変化する前と変化した後の1分間の利用帯域を測定した。

帯域の制限は以下の2項目行った。

- A) 利用可能帯域が 8000kbps から 256kbps へ減少させた場合
- B) 利用可能帯域が 256kbps から 8000kbps へ増加させた場合

6.2 評価実験結果

評価実験結果を図6に示す。Aの実験では、帯域変更前(8000kbps)の1分間の平均利用帯域は約 7745.04kbps で、帯域変更後(256kbps)の1分間の平均利用帯域は約 109.60kbps であった。Bの実験では、帯域変更前(256kbps)の1分間の平均利用帯域は

約 107.04kbps で、帯域変更後(8000kbps)の 1 分間の平均利用帯域は約 7613.04kbps であった。また、A の実験の帯域使用率は、帯域変更前が 96.81%で帯域変更後が 42.81% となり、B の実験の帯域利用率は、帯域変更前が 41.81%で帯域変更後が 95.16% となった。以上の実験結果から、本システムはネットワークパラメータの変化に合わせてメディアの切り替えを行うことができ、この結果追従性を確認することができた。しかしながら、帯域制限が 256kbps の時の帯域使用率が低いことがわかる。これは、作成した品質表のレベル分けの粒度が大きかったためだと思われる。

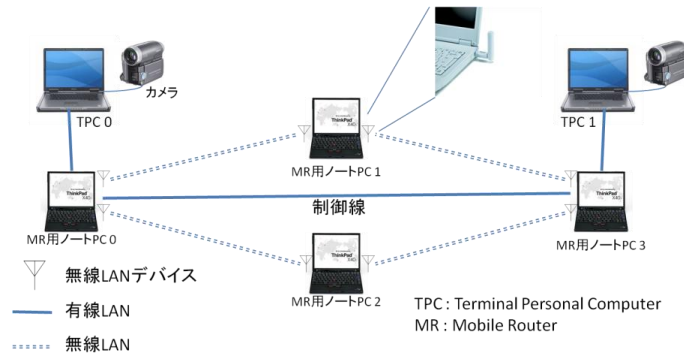


図5 プロトタイプシステム案
Figure 5 Plan of the prototype system

7. まとめと今後の課題

本稿において、複数の異種規格無線 LAN で構築されたアドホックネットワーク上で動作し、ネットワークパラメータとユーザ要求を考慮しメディア品質と種類を選択するシステムを提案し、動的なメディア選択を実現する手法について考察した。そして、提案したシステムを実装し、評価実験を通して提案したシステムが正常に動作することを確認した。しかしながら、評価実験をする際に COBRA System 側でメディア切り替えのメッセージや経路選択のためのメッセージがエンド間でうまくやり取りができなくなる問題が浮かび上がってきた。今後、COBRA System に制御線を設け、パケットロス許さないパケットなどは制御線でやり取りする仕組みを導入する必要がある。さらに、提案手法を満たしたシステムを実装し、システム評価をすることで提案手法の有用性を検証していく必要がある。具体的には、本システムの動画圧縮、エンコードでフレームレートや解像度の変更幅を増やすこと、音声を低ビットレートに圧縮、エンコードすることなどがあげられる。そのうえで、展開が容易なプロトタイプ

システムを構築し、性能評価実験をすることで有用性の確認をしていきたい。さらに評価実験から、メディア品質表の作成方法をさらに検討していく予定である。

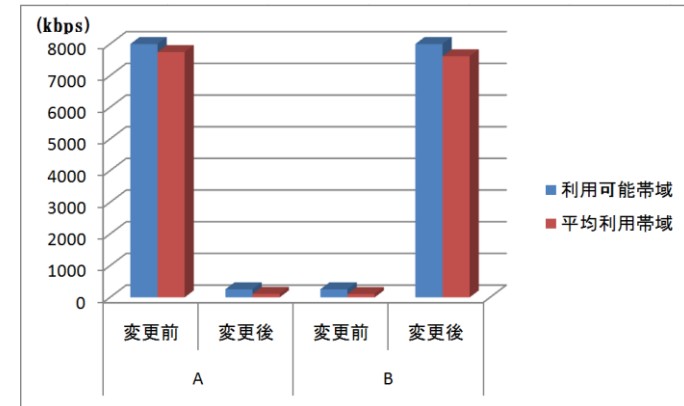


図6 評価実験結果
Figure 6 Experimental Result

参考文献

- [1] 柏田康志, 柴田義孝, "異種無線相互接続によるモバイルネットワークの研究", 情報処理学会第 68 回全国大会講演論文集, pp.3.713-3.714, 2006 年 3 月
- [2] 佐藤剛至, 柴田義孝, "災害情報システムのための動的ネットワーク再構成手法に基づいたコグニティブ無線に関する研究", 電子情報通信学会 2011 年総合大会講演論文集, 基礎・境界, pp.S.63-S.64, 2011 年 2 月 28 日
- [3] 間瀬憲一, 岡田啓, 大和田泰伯, "中山間被災地復興へ向けた無線ブロードバンド提供の実践的取組み: 山古志ねっと共同実験プロジェクトの概要", 電子情報通信学会誌, 91 巻 10 号, pp.857-861, 2008 年 10 月 1 日
- [4] 内田法彦, 高畑一夫, 柴田義孝, "コグニティブ無線をベースとした災害情報ネットワークにおける Min-Max 法を用いた拡張 AHP による経路選択", マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2010) シンポジウム, pp.1928-1938, 2010 年 7 月 15 日
- [5] OGA 's Web Page, <http://hp.vector.co.jp/authors/VA032928/>