

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 コグニティブ無線の研究

佐藤剛至[†] 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，中山間地域住民の災害時の安心・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．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効性を検討していく．

Research on Dynamic Network Configuration Method based Cognitive Radio LANs for Disaster Information System

GOSHI SATO[†] YOSHITAKA SHIBATA[†]

About 60 percent of the country in Japan is an intermediate and mountainous area. An existing communication infrastructure cannot be used 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. The system that takes the mechanism that the communication method and the frequency are dynamically switched responding to the communication environment and the best communication route is secured is mounted.

1. はじめに

近年の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，IEEE802.11b,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，実効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．これらのネットワークは周囲の環境を考慮して構築されていないことが問題であるといえる．

本稿では，IEEE802.11b,g,j や WiMAX，携帯電話網などの特性の違う無線通信技術を，ノード間の距離や送信出力，使用周波数帯，実効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調的に利用することで，災害情報ネットワークは形成される．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選択される．ユーザは，本システムで提供するネットワークを通して災害情報をやり取りすることで，ネットワークのインフラの一部で何らかの障害が起きた場合でも，通信を続けることが可能となる．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，構築したプロトタイプシステムを用いて本システムの機能と性能を評価した．

以降，2 章で災害情報について説明する．3 章では，システム概要とシステムアーキテクチャについてそれぞれ説明する．ノード間リンク選択とエンド間経路選択による経路選択手法については，4 章で説明を行う．5 章では，プロトタイプシステムとその性能評価について述べる．最後に，本論文の結語と今後の展望についてまとめる．

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．

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

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 以降は復旧期となる。

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が損傷す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、復興初期では小さく、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 既存技術概要と問題点

複数の無線通信規格を使用した技術として、企業の業務システムと PC や PDA などのクライアント端末との間で VPN (Virtual Private Network) を使い、利用者にとって最適なネットワーク環境を次々に自動的に認識(クロス・ネットワーク・ローミング)して接続を維持できるソフトウェア「IBM Web Sphere Everyplace Connection Manager」や、移動するネットワークと外部ネットワークを接続するルータを使用し、複数の無線通信規格を収容して通信エリアや通信速度などを判断基準として動的に切り替え、ネットワーク単位でのシームレスな移動性をサポートする「KDDI Mobile Router System」が挙げられる。これらの技術は Mobile IP を拡張し、アプリケーションのセッションも維持したままシームレスなローミングが可能となった。しかし、大規模なシステムが必要なので災害時に運用しにくく、ソフトウェアが高価なので規模の小さい自治体

には導入しにくいという問題があるため、安価でプリミティブかつ小型な無線 LAN システムを利用した災害情報ネットワークを構築するシステムが必要であると言える。

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、山古志ねっと共同実験プロジェクト[2]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。

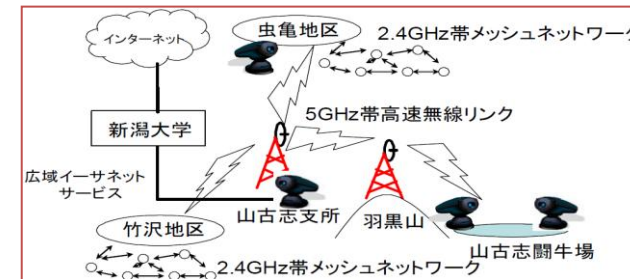


図 1 山古志ねっとのネットワーク構築

Figure 1 System Configuration of Yamakoshi Net

しかしながら、山古志ねっ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留まっており、中山間地域の被災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。このような問題を解決するため、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が必要であると言える。

3.2 研究目的

本研究の目的は、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大きく分けて以下の 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

4. システム構成

4.1 システム概要

提案システムは図2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。

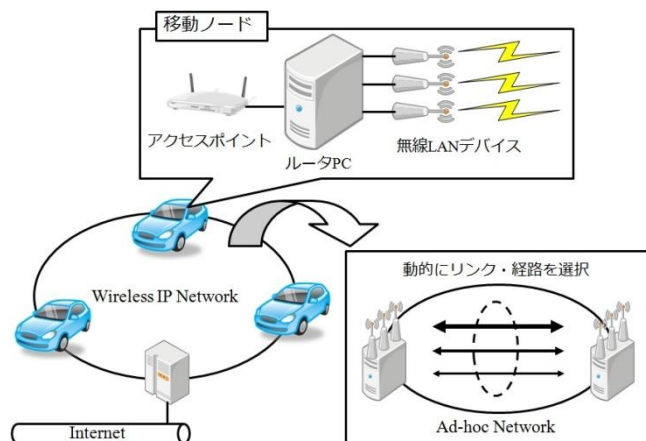


図2 システム概要図

Figure 2 System Configuration

4.2 リンク選択アルゴリズム

本システムによって構築されるネットワークの経路選択には、リンク選択とルート選択の2つのフェーズが存在する。リンク選択はすべての隣接ノード間において実行される。また、ルート選択は送信元ホストから宛先ホスト、もしくはデフォルトゲートまでのエンド間の通信において実行される。

ルート選択に先立ち、リンク選択を行う必要がある。ルータ PC は、収容されているすべてのリンクについて、現在の隣接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の監視を定期的に行う。監視の結果得られたパラメータ値に基づきリンクの優先度を算出することで、実際にアクティベートするリンクを決定する。

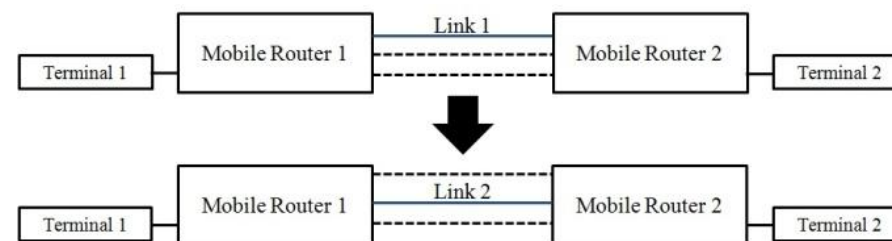


図3 隣接ノード間のリンク選択

Figure 3 Link Selection Method

リンク選択はルータ PC 間で執り行われる。ルータ PC は、定期的な隣接ノード間のスループット、遅延時間、電界強度やパケットロス率などをモニタリングし、それらの複数の評価基準やユーザの要求に基づいて最適なリンクを決定する。この意思決定において、複数の要素を多角的に評価可能な Extended AHP[3]を用いる。Extended AHP を用いたリンク選択における処理プロセスは以下の手順に基づいて実装される。

1. 現在選択中のリンクは Link1 である。
2. それぞれのノード間のすべてのリンクでネットワーク性能を測定する。
3. Mobile Router 1-2 間 Link1 の AHP 優先度が、Link2 よりも低下したことを察知。
4. Mobile Router 1 は Mobile Router 2 へ、Link2 へ接続を切り替える要求を発行する。
5. リクエストを受信したホストは、確認応答をリクエストもとへ発行する。
6. Mobile Router 1 と 2 で選択中のリンクを Link2 へ切り替える。
7. 現在選択中のリンクは Link2 である。

4.3 経路選択アルゴリズム

本研究の提案手法において、もし隣接するあるノード間でリンク状態が確保できない場合は、ネットワークの経路変更を行う。経路変更においても、実ネットワーク性能に基づいて最適な経路を決定するため、従来のアドホックネットワークルーティングプロトコルの一つである AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)に拡張 AHP を用いた意思決定手法を取り入れた、Extended AODV[3]を導入する。これにより、周囲の通信環境の変化に柔軟に対応しつつ、ユーザ要求を考慮した QoS 制御可能なネットワークの構築を実現する。Extended AODV における経路選択は、以下のアルゴリズムに基づいて実装される。具体的には、候補経路間に存在するノード間における前節で述べた拡張 AHP 計算結果をすべて調査し、最終的に経路間のボトルネックスコアの最も高かった経路を実際に利用する。

1. Source Node からパケットをブロードキャスト送信
2. パケットを受信したノードは AHP 情報を付与しつつ隣接ノードへパケットを渡していく
3. Destination Node に到達したパケットを解析し、経路を決定
4. 選択した経路に返信パケットを逆流させ、経路情報を更新する

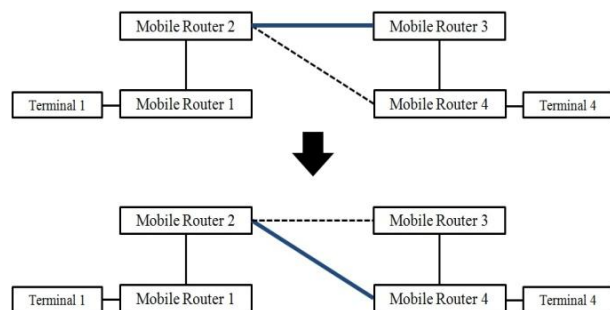


図4 中継するモバイルルータの選択
Figure 4 Mobile Router selection method

5. システムアーキテクチャ

本システムのアーキテクチャは図3に示すとおり、Network Monitoring Layer, Network Configuration Layer, Network Layer の3層からなる。

本システムでは Sensing Data と Routing Message の2つのメッセージのやり取りによって、通常の送信パケットである Transmitted Data を操作する。

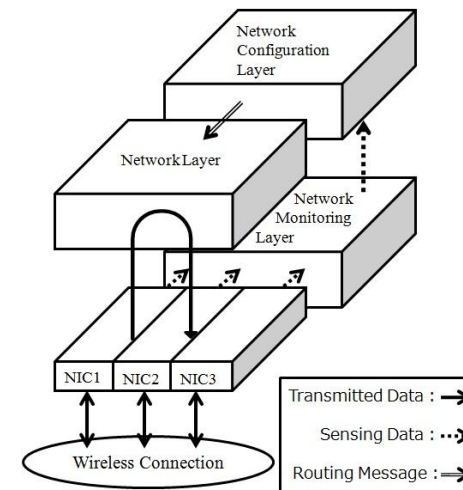


図5 システムアーキテクチャ
Figure 5 System Architecture

本システムのソフトウェアアーキテクチャを図5に示す。提案システムをソフトウェアとして実装したものを本研究では COBRA System(COst Based Routing Assist System)と呼称する。実際に筆者らが実装するのは図5における Network Monitoring Layer と Network Configuration Layer の2レイヤであり、Network Layer は既存ソフトウェアによって OSPF を稼働させる。各レイヤの機能概要を以下に示す。

[Network Monitoring Layer]

- ネットワークの監視・ネットワーク性能値の取得
 - 電界強度、パケットロス率、パケット遅延、スループット

[Network Configuration Layer]

- Extended AHP による総合値の算出
- 総合値に基づいたリンク選択
- Extended AODV による経路選択
- リンク・経路を実際にアクティベートするための OSPF コスト値設定機能

[Network Layer]

- 拡張 AODV に基づいたルーティング

Network Monitoring Layer は収容されているネットワークの性能を監視し、Sensing Data として取得したデータを随時 Network Configuration Layer へ渡していく。Sensing Data を受け取った Network Configuration Layer は Extended AHP に基づいてリンクを選

定すると同時に、Extended AODV に基づいて経路を選択する。その後、OSPF のコスト値を COBRA System によって適切に操作することで、実際にリンク・経路を有効化する。これにより、通常の通信データを適切な経路で送信することが可能となる。

6. プロトタイプシステム

本システムにおける経路選択手法の基本的な性能を評価するため、プロトタイプシステムを構築した。本プロトタイプシステムは図7に示す通り MR (Mobile Router) 4 台を、IEEE802.11g (54Mbps モード), IEEE802.11b (11Mbps モード), IEEE802.11n (2Mbps モード) の計 3 種類の無線リンクの相互接続によって構成されていて、MR 上ではオープンソースのルーティングソフトである Quagga[11]により、OSPF が稼働している。OSPF にはコストと呼ばれる NIC 毎に設定できるメトリックに似た値が存在し、パケット送出時の優先度のように扱える。そこで我々は、電界強度や実効スループット、パケットロス率、ラウンドトリップ時間のような通信環境の変化に応じて動的にコスト値を書き換え、拡張 AODV に基づいた経路選択手法を実現するためのアプリケーションを開発し、システムアーキテクチャに基づきこれを実装、COBRA System と名付けた。

本プロトタイプシステムは屋内で構築し、COBRA System の経路切り替えを人為的に発生させるため、全経路のネットワーク性能を tc コマンド(Traffic Control コマンド)により制御している。本プロトタイプシステムで考慮しているネットワーク性能は実効スループットとラウンドトリップタイムである。

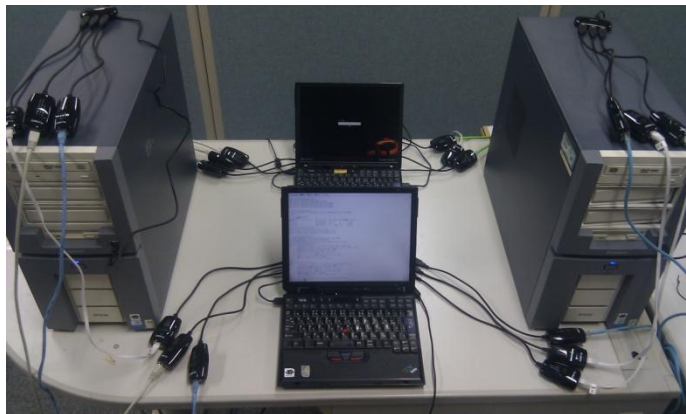


図6 プロトタイプシステム機器構成外観
Figure 6 Prototype System Device Configuration

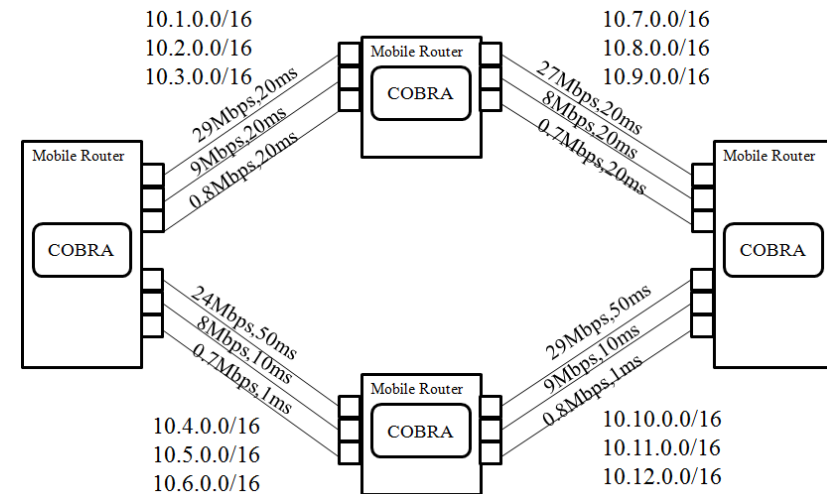


図7 プロトタイプシステムのネットワーク構成図
Figure 7 Prototype System Network Configuration



図8 無線 LAN デバイス拡大画像
Figure 8 Wireless LAN Devices

本プロトタイプに実装する予定の無線 LAN ユニットの、屋外用無線 LAN とアンテナ、稼働させる無線 LAN モードの組み合わせにより 3 種類に分類される。1 つ目は SB-5000(アイコム株式会社製)に付属の八木アンテナを接続し、IEEE802.11g の 54Mbps 固定モードで稼働させた無線 LAN デバイスである。これはカタログスペックでの最大伝送距離は 1.0km である。2 つ目は同じく SB-5000 に付属の八木アンテナを接続し、こちらは IEEE802.11b の 11Mbps 固定モードで稼働させた無線 LAN デバイスである。これはカタログスペックでの最大伝送距離は 2.0km である。3 つ目は AIRPORT LAN

JET LINK300 (関西電機株式会社製)に付属の八木アンテナを接続し、IEEE802.11b の 2Mbps 固定モードという比較的低速で稼働させた無線 LAN デバイスである。これはカタログスペックで最大伝送距離 6.0km を達成する。これらの無線 LAN ユニットの MR に装備された複数の NIC にそれぞれ収容され、マルチホーミングを実現する。

予備実験として、本システムに実装する予定の無線 LAN デバイスについての性能測定を行った。通信距離の長距離化によってどのようにネットワーク性能が減衰していくかといった部分を実測した。

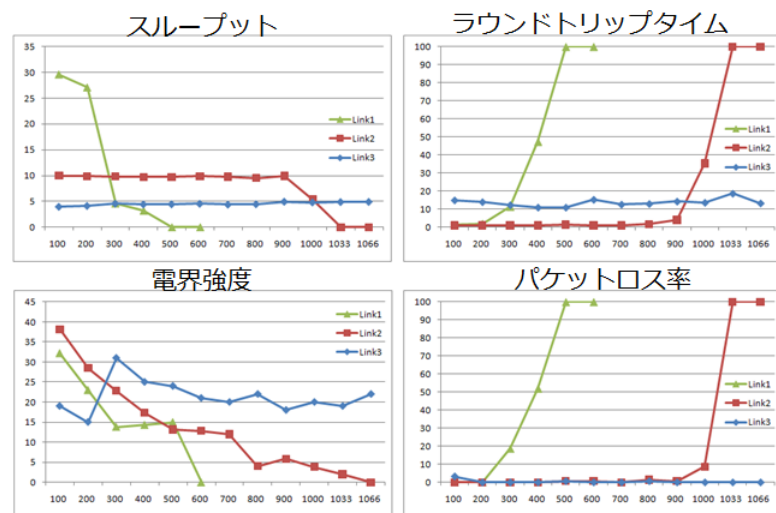


図9 無線 LAN デバイスネットワーク性能測定結果
Figure 9 Performance of Wireless Link

実験結果における実効スループットとラウンドトリップタイムの測定結果を鑑み、プロトタイプシステムで制御するリンク毎のスループットおよび RTT 値の幅を決定した。

次に、COBRA System による拡張 AODV に基づいた経路変更が意図したとおりに行われるかを実験した。本実験環境でのネットワーク性能設定は、図 7 に記載してある通りにあらかじめ tc コマンドを用いてエミュレートしておく。実験シナリオとして以下の 3 つの状況を想定した実験を行う。

1. 一部のネットワーク性能が悪化した場合の経路変化を観察
2. ネットワークユーザからの要求が変更された場合の経路変化を観察
3. ビデオチャットを行う場合の拡張 AHP 計算の有無による影響を検証

まず 1 のシナリオでは、ユーザ要求をスループット重視に固定した状態で、現在選択されている経路間における実効スループットを 10Mbps 低下させて実験を行った。低下したノード間で拡張 AHP の再計算が行われ、意図したとおり、別経路を選択するように経路変更の意思決定が行われるのを確認できた。

次に 2 のシナリオだが、ユーザから提示されるユーザ要求を、スループット優先からラウンドトリップタイム優先へ変更することで実験を行った。本実験中にネットワーク性能の変更は行わない。ユーザ要求が変更されると、すべてのノードで拡張 AHP の再計算が行われ、それに伴い今回の場合最も RTT の小さいリンクが選択される。その後、経路選択が行われ、最適な経路が選択されたことが確認できた。

最後に 3 のシナリオでは、ビデオチャット通信を行う際の経路再構成が、拡張 AHP 計算がある場合とない場合でどのように変動するかを観察する。ビデオチャットは、実効スループットと RTT のどちらも考慮して経路を考えなければいけないが、拡張 AHP の概念を導入していない場合、実効スループットか RTT どちらかしか考慮できないため、「スループットは 27Mbps だが RTT が 200ms」の経路を選んでしまったり、「RTT は 1ms だがスループットが 0.7Mbps」の経路を選んでしまったりと、どちらかに偏った経路を選択してしまったり。拡張 AHP を導入した場合、スループットと RTT といった複数の要素を重み(例 4:6)として扱うことが可能である。これにより、最も適した経路を選択することが可能であることを確認した。

7. まとめ

本稿において、複数の異種規格無線 LAN を選択的に利用してアドホックネットワークを再構築するシステム提案し、動的なリンク切り替えを実現する手法について考察・COBRA System として実装することでその有効性を検証した。本研究において構築する異種規格無線 LAN ネットワークの機能要件として、外部通信環境の変化やそれに伴うネットワーク性能の変化の検知、そしてその情報に基づいて最適なリンク・経路への切り替えがあり、外部通信環境の変化によるリンク品質の変化を検知する機能を COBRA System として開発した。COBRA System を組み込んだプロトタイプシステムはリンク特性の違う無線ユニットを複数用いて実装され、リンク間のネッ

トワーク性能を拡張 AHP に基づき解析し、OSPF のコスト値を動的に書き換える COBRA System の機能により実ネットワーク性能に即したリンク切り替えが可能であることを実証、同時に拡張 AODV による適切な経路選択が可能であることを確認した。今後、COBRA System の定性的な評価によって、本システムで選択された経路がユーザにとって満足できるものかどうかを検証していくとともに、現在のシステムが抱えるデバイスの大きさや消費電力の問題点を解消するためユニットの小型化・省電力を進めていく。同時に、COBRA System 専用のルーティングプロセスを開発することで、さらなるパフォーマンスの向上を図っていく。

参考文献

- [1] 異種無線相互接続によるモバイルネットワークの研究, 柏田康志, 柴田義孝, 橋本浩二, 岩手県立大学ソフトウェア情報学部, IPSJ2008 全国大会, 2008
- [2] 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り組み山古志ねっと共同実験プロジェクトの概要新潟大学大学院自然科学研究科・超域研究機構・災害復興科学センター間瀬憲一, 岡田啓, 大和田泰伯
- [3] 内田法彦, 高畑一夫, 柴田義孝, ”防災災害情報ネットワークにおけるコグニティブ無線リンクおよび経路制御法”, 2009 情報処理学会
- [4] 西尾義則, 柴田義孝: 時空間データを考慮した大規模分散型災害情報提供システム, 情報処理学会第 70 回全国大会 3ZJ-3 Mar.2009
- [5] 中山間地等の集落散在地域における地震防災対策に関する検討会提言, 中山間地等の集落散在地域における地震防災対策に関する検討会(2005.8)
- [6] 中山間地等の集落散在地域における孤立集落発生の可能性に関する状況調査 (都道府県アンケート調査) 調査結果, 内閣府政策統括官防災担当(2005.8)
- [7] Chang Woo Pyo, Mikio Hasegawa : Minimum Weight Routing based on a Common LinkControl Radio for Cognitive Wireless Ad hoc Networks, IWCM C' 07, August 12-16, 2007, Honolulu, Hawaii, USA.
- [8] Quality of Service Routing for Real-Time Applications using the Analytical Hierarchy Process, Albara Awajan, Khalid Al-Begainand Paula Thomas. DOI 10.1109/UKSIM.2008.98
- [9] Design and Implementation of a Context-Aware Decision Algorithm for Heterogeneous Networks, Tansir Ahmed, Kyandoghere Kyamakya, Markus Ludwig, SAC'06, April, 23-27, 2006, Dijon, France.
- [10] Quagga Routing Suite : [http://www.quagga.net/Using Parallel Wireless Links and Path Diversity](http://www.quagga.net/Using%20Parallel%20Wireless%20Links%20and%20Path%20Diversity), Published online: 22 April 2008
- [11] Quagga Routing Suite : <http://www.quagga.net/>