

SDN によるコグニティブ無線技術を基盤とした 災害に強いネバー・ダイ・ネットワークに関する研究

佐藤剛至^{1,a)} 柴田義孝^{1,b)} 内田法彦^{2,c)}

日本の国土の約 6 割は中山間地域であり、そのような場所で地震や津波等の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における安心・安全のためのインフラを確保するため、OpenFlow に代表される SDN によって実現するコグニティブ無線技術を基盤として、堅牢かつ迅速に復旧可能な災害情報ネットワークを構築する。ネットワーク環境やポリシーの変更に対し自律的に無線アクセス網やネットワーク経路を切り替える仕組みを実装し、プロトタイプシステムを構築して提案手法の評価を行った。

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 規格の無線 LAN 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),2),3)}。しかしながら、刻々と状況が変化する被災地においては、無線 LAN ネットワークは影響を受けやすいため、常にネットワーク環境を監視し、適切な経路制御を行う必要がある。

本稿では、IEEE802.11a,b/g に代表される無線 LAN や WiMAX, 3G 携帯電話網・通信衛星などの特性の違う無線アクセス網を、ノード間の電界強度やエンド経路間のラウンドトリップタイム、実効スループット、パケットロス率などのネットワーク性能を監視し、それらの変化に対応し適切に切り替えて利用する。また、固定基地局と移動基地局を協調的に用いることで、緊急時だけでなく、通常時にも利用可能なネットワークを構築する。

本研究において構築するネットワークのノードは、複数の無線アクセス網を選択的に利用するコグニティブ無線⁵⁾機能と、部分的にネットワークを拡張する無線アドホックネットワーク機能を持つ。ユーザは、本システムが提供する多重化された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であるとともに、ネットワーク資源を有効に活用することが可能となる。テキストチャットデータの通信経路を通信衛星へ迂回させて高速な通信網を大容量データ転送専用としたり、VoIP 通信のために可能な限り低遅延な経路を選択し提供したりといった例が挙げられる。

我々は、複数の異種規格無線ネットワークを利用したコグニティブ無線ネットワークと無線アドホックネットワークを設計し、SDN 技術を用いて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。

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 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					◎	◎	
支援者・親族	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。

1 岩手県立大学
Iwate Prefectural University, Japan.
2 埼玉工業大学
Saitama Institute of Technology, Japan.
a) g2361001@s.iwate-pu.ac.jp
b) shibata@iwate-pu.ac.jp
c) uchida@sit.ac.jp

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 WebSphere 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 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 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。

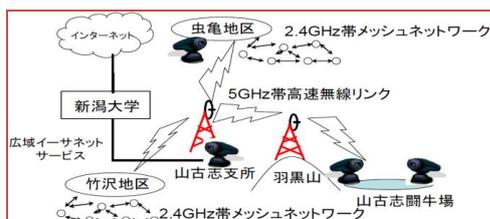


図1 山古志ねっとのネットワーク構築

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アクセス網を利用して重層的なネットワークを構築し、ユーザポリシーやアプリケーションによって柔軟に経路を切り替え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、複数の無線通信方式をコグニティブ無線技術で重層化することで、通常時には地域のインターネットアクセス網として活用し、災害発生時には通信環境の悪化に耐え、しぶとく通信を維持すると共に、柔軟に通信網の再構成が可能な広帯域ネバー・ダイ・ネットワークを構築することである。本システムを実現するために必要な機能は大きく分けて以下の2つ。

1. コグニティブ無線
 - (ア) 収容する無線アクセス網の性能を常に監視する機能
 - (イ) 監視結果に基づいた最適な無線アクセス網への切り替え機能
2. 無線アドホックネットワーク
 - (ア) 自律的なマルチホップネットワーク形成機能
 - (イ) ネットワーク性能の監視結果に基づく経路制御機能

4. システム構成

4.1 システム概要

本研究で提案する災害情報ネットワークは、図2で示されるように、複数の異種無線アクセス網を収容したコグニティブ無線ルータで構成される。本端末は、固定ノードと移動ノードに配置される。固定ノードでは SDN 制御用のチャンネルとして常に相互接続可能な衛星通信を利用し、制御チャンネルを持たない移動ノードは、主に自律的なアドホックネットワーク構築を行う。

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。

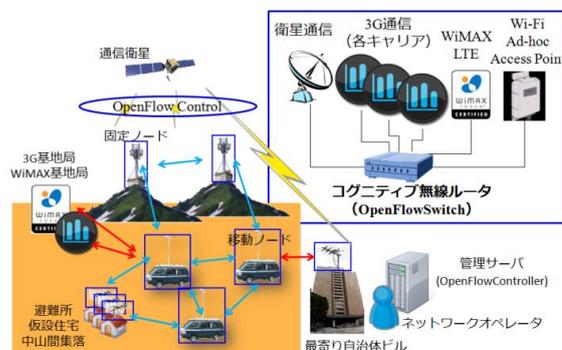


図2 システム概要図

Figure 2 System Configuration

4.2 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、Monitoring Layer, OpenFlowSwitch, OpenFlowControllerの3層からなる。

本システムでは、Monitoring Layerが監視したネットワーク性能の結果を逐次OpenFlowControllerへ通知し、それに基づいて経路を決定し、OpenFlowSwitchへ命令を出すことで、経路制御を実現する。

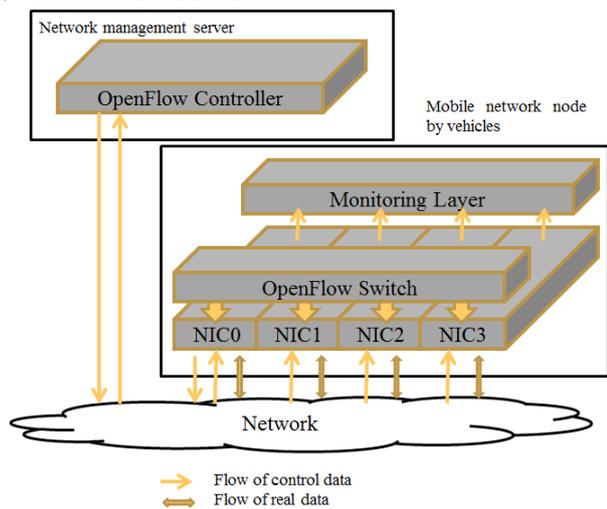


図3 システムアーキテクチャ

Figure 3 System Architecture

Monitoring Layerは、自身が収容しているすべての無線リンクの性能を定期的に監視する。監視するパラメータは、リンク間の電界強度、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等である。監視の結果得られた現在のパラメータ値はSensing DataとしてOpenFlowControllerに渡される。

OpenFlowControllerでは、Sensing Dataと、ユーザからのネットワークに対する要求をもとに、経路・リンクそれぞれに優先順位を付ける。そして、最も優先順位が高い無線リンクが接続されているNICを、実際の経路として利用する。選択された経路は、FlowModによりフローテーブルを書き換えることで有効となる。

OpenFlowSwitchは、OpenFlowControllerからのFlowModにより書き換えられたフローテーブルを参照し、パケットの転送を行う。

5. 経路選択手法

本システムによって構築されるネットワークは、コグニティブ無線ネットワークと無線アドホックネットワークの2種類が存在する。本章では、コグニティブ無線ネットワークにおいては、データを送出する無線アクセス網リンクを選択する手法を、無線アドホックネットワークにおいては、中継するモバイルルータを選択するためのアドホックルーティングプロトコルをそれぞれ説明する。

5.1 リンク選択

本研究で構築するコグニティブ無線ルータは、データを送出するための無線アクセス網を複数収容している。本システムでは、収容されているすべての無線アクセスリンクについて、接続基地局との電界強度や実効スループット、ラウンドトリップタイム等のネットワーク性能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、実際に経路として利用する無線アクセスリンクを決定する。

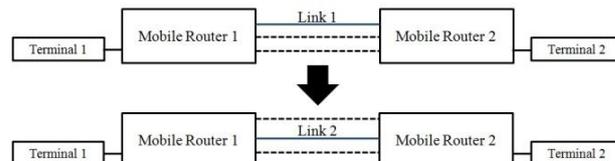


図4 コグニティブ無線ルータ間のリンク選択

Figure 4 Link Selection Method

コグニティブ無線ルータは、OpenFlowControllerを介して常にメッセージをやりとりする。リンク選択におけるメッセージフローは図5で示す通りであり、以下のアルゴリズムに基づいて実装される。なお、OpenFlowControllerはコグニティブ無線ルータ間を仲介する役割を担うため、図中では割愛して説明している。

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定期的なSensing Dataのフラッディングによって把握する。
3. Mobile Router 1が、Mobile Router 1と2をつなぐLink1のスループット（またはそれ以外のネットワーク性能）が低下したことを察知する。
4. Mobile Router 1は、Link2へ接続を切り替えるようにリクエストを発行する。
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。

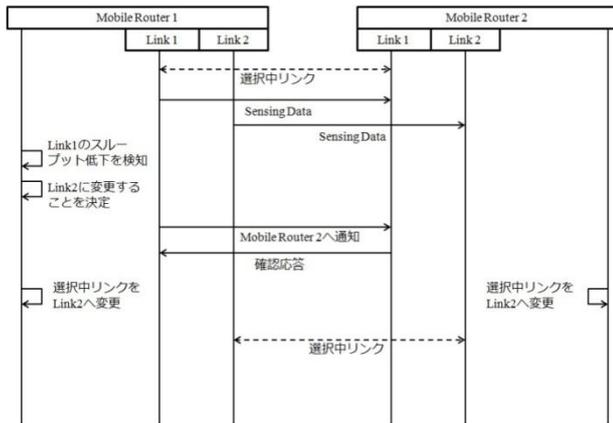


図5 リンク選択におけるメッセージフロー

Figure 5 Message Flow of Link Selection

5.2 ルート選択

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AHP⁴⁾を用いた意思決定手法を取り入れた、Extended AODV⁴⁾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、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

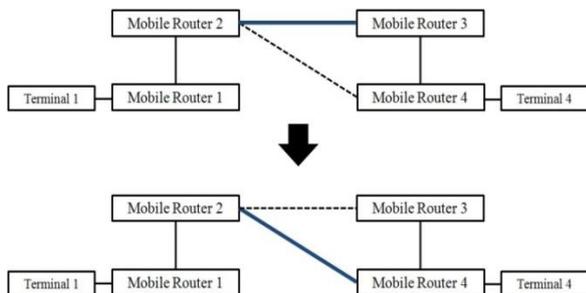


図6 中継するモバイルルータの選択

Figure 6 Mobile Router selection method

従来のAODVプロトコルでは、送信元から送信先の間で最小ホップ数を与える経路が選択されるが、これが必ずしも最適な経路とは限らない。なぜなら、各ノードが複数の

物理的性質の異なる無線リンクを有するので、例えば1ホップのIEEE802.11b通信よりは、2ホップのIEEE802.11a通信のほうが広帯域のためユーザがビデオ通信を優先した場合には適しているという状況が考えられるためである。このため、本研究ではリンク選択において計算されたExtended AHPによる各無線リンクの優先度の計算結果をRREQとRREPに加え、Min-Max法により最適な経路選択を行う手法を提案する。これにより、ポリシーごとにEnd to endでスループットのような優先するネットワーク性能値を比較したり、候補経路すべてでAHP計算を行ったりするよりも、よりユーザの意思を反映させることができ、かつ高い計算効率を実現できる。

本提案手法では、従来の経路履歴に加えて前項で述べたノード間での最適な無線リンクおよび優先度の値を、RREQパケットに追加する。そして後述するMin-Max法により最適な経路選択を行った後、RREPパケットを選択された経路上を受信側から送信元に向かって中間ノードを通じて経路決定の通知を行う。

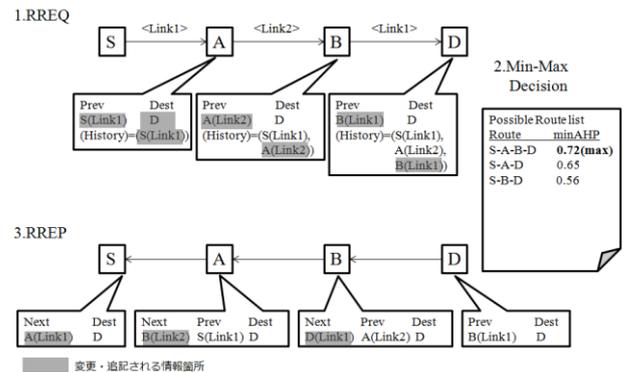


図7 拡張AODVメッセージフロー

Figure 7 Message Flow of Extended AODV

例えば、図7に示すように送信元ノードSから送信先ノードDにデータ送信を行いたい場合、まず、通常のアODV法と同様にノードSはRREQパケットをブロードキャスト配信する。隣接する中継ノードAは前の隣接ノードIDの他、使用された最適無線リンクIDおよびExtended AHPによる優先度の値を保存し、固有RREQに準じた経路履歴に追記する。次に、ノードAは同様にノードSを除く隣接ノードへRREQパケットをブロードキャスト配信し、受信した隣接ノードBは同様の処理を行う。このようにして最終的に目的の送信先ノードDにRREQパケットが到達するまで処理が繰り返される。

次に、RREQパケットが送信先ノードに達すると、送信先ノードは一定時間複数のRREQパケットの到着を待ち、経路情報とAHPによる優先度情報を持った候補経路のリストを作成する。そうして作成された候補経路は以下のMin-Max法を用いた手法により最適な経路が選択される。

1. 各候補経路リストにおいて、それぞれ最適な無線リンクの優先度を比較する
2. その中から最小値を候補経路ごとに抜粋する
3. 候補経路ごとの最小値を比較しその中から最大値を有する経路が最適な経路として選択される

そして、この Min-Max 法により選択された経路に従い、ノード D は RREP パケットを送信先へ返信するのだが、その際中継ノードは RREQ パケット送信時に作成した「隣接した送信ノード」を参照しながら返信を行い、これにより各中継ノードは隣接する送信、受信ノードを知ることとなる。

6. プロトタイプシステムと評価

本プロトタイプに実装する無線 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。これは公称最大伝送距離 6.0km を達成する。プロトタイプシステムの実際のハードウェア構成及び無線 LAN ユニットの図 8 に示す。

予備実験として、これらの無線 LAN デバイスの通信可能距離とネットワーク性能の評価を行った。実験結果は図 9 の通り。



図 9 無線 LAN ユニット拡大画像
Figure 9 Wireless LAN Unit

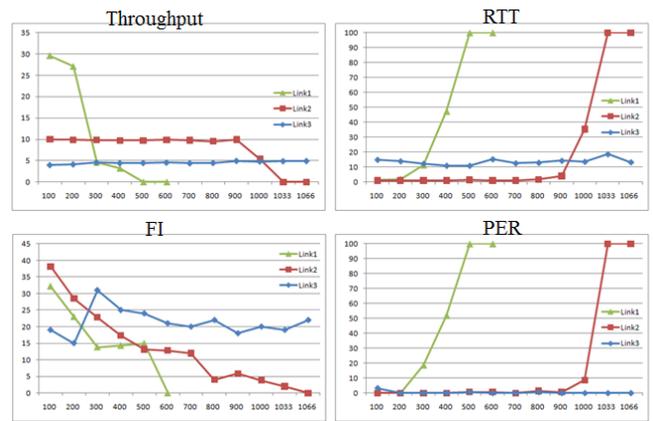


図 10 無線 LAN ユニット性能
Figure 10 Performance of Wireless Link

本実験の結果を踏まえて、以下の 3 つのシミュレーションシナリオに基づきプロトタイプシステムの評価実験を行う。

- 1) ネットワークの一部の性能が突然悪化した場合。
- 2) ユーザポリシーを変更した場合
- 3) 拡張 AHP によりビデオ会議アプリケーションに適した経路に変更する場合

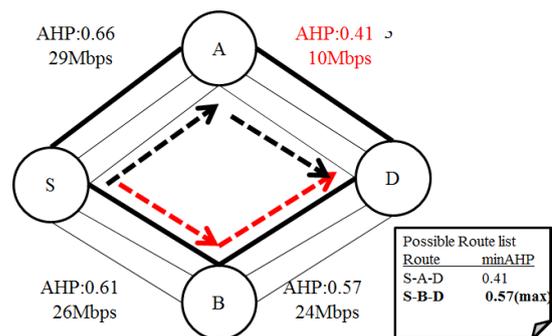


図 11 シナリオ 1
Figure 11 Scenario 1

シナリオ 1 では、スループットに重点を置いたユーザポリシーのもと、選択経路内のリンクの一部を 10Mbps まで低下させた。結果として、ネットワーク性能が悪化した際に、拡張 AHP による計算が自動的に行われ、新たに適切な経路へ切り替えることが可能であると確認できた。

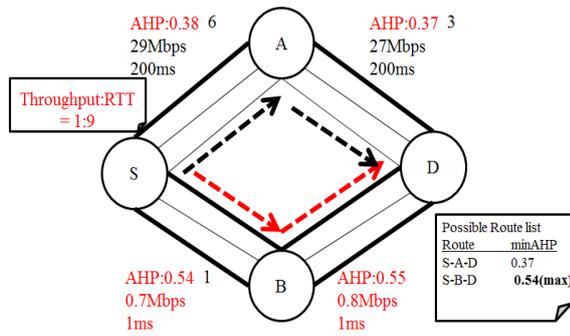


図 1 2 シナリオ 2
Figure 12 Scenario 2

シナリオ 2 では、ユーザポリシーがスループット重視から RTT 重視へ変更する。本実験により、ユーザポリシーが変更された場合においても、拡張 AHP の再計算がおこなわれ、適切な経路が選択されることが確認できた。

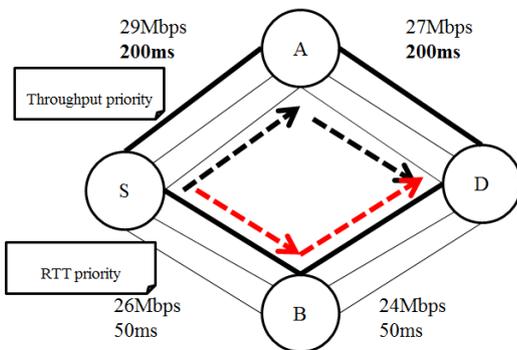


図 1 3 シナリオ 3
Figure 13 Scenario 3

シナリオ 3 では、プロトタイプシステムにおけるテレビ会議アプリケーションの有効性を検証するため、スループットと RTT の優先度を 1:1 に設定して実験を行った。結果として、スループットだけでなく、RTT も考慮したテレビ会議通信で有効な経路を選択可能であることを実証した。

次に、リンク選択手法の基本的な動作とその時のネットワーク性能の変化を確認するため、図 1 4 に示す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、1 つの OpenFlowController マシンと 2 つの OpenFlowSwitch マシン、2 つのホスト PC から構成される。OpenFlowController マシンは、Trema[7]をインストールすることで OpenFlow コントローラーとして動作させている。OpenFlowSwitch マシンは、OpenvSwitch[8]をインストールしており常に OpenFlowController マシン

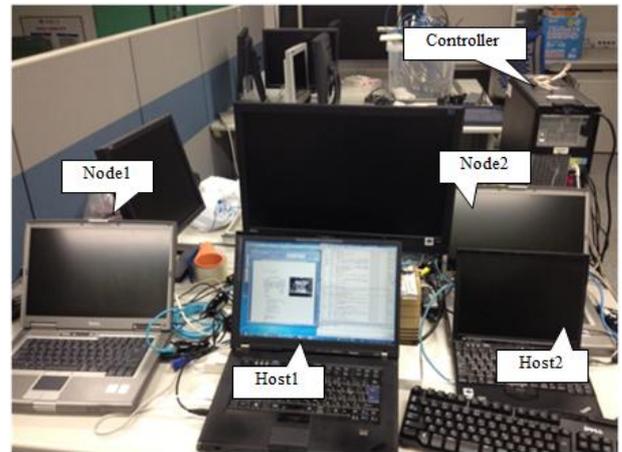


図 1 4 プロトタイプシステム
Figure 14 PrototypeSystem

と通信可能な状態にある。また本システムでは、リンク変更に必要な 3 つのモジュールを実装している。1 つ目は、スループット・ラウンドトリップタイム・パケットエラー率の測定を行うモジュール、2 つ目は測定結果を OpenFlowController へ送信するためのモジュール、そして 3 つ目は収集したネットワーク性能を計算し、経路を決定するためのモジュールである。なお、本本プロトタイプシステムの実証実験においても、無線ネットワークの性能変化は Linux の tc コマンドを用いてエミュレートした。

Time delay of links by TC command

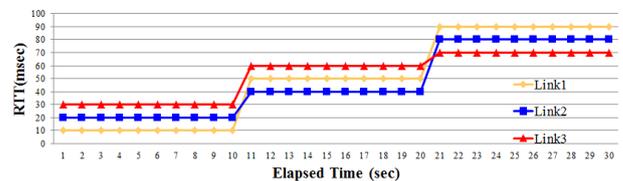


図 1 5 tc コマンドにより設定された各リンクの RTT 遷移
Figure 15 Assaigned Time Delay of Links by TC Command

Result of End-to-End RTT

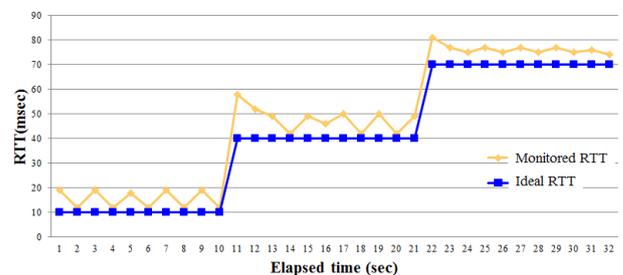


図 1 6 実際に選択された経路の RTT 測定結果
Figure 16 Selected Links by Prototype System on TC Command

tc コマンドによってエミュレートしたリンクの RTT を図 15 に、エミュレートしたネットワーク上で本システムを稼働し、結果として選択されたネットワークの RTT 測定結果

を図 16 に示す. 図 15 に示す通り, 各リンクの RTT を 10 秒ごとに変化させ, 且つ最少 RTT を持つリンクを 10 秒ごとに切り替えるようにエミュレートを行った. その結果, 図 16 に示すように, 常に最少の RTT を持つリンクに適切に切り替えることが実機で構築したプロトタイプシステム上で実現出来た.

7. まとめ

本稿において, 複数の異種規格無線アクセス網を選択的に利用してコグニティブ無線ネットワーク, 及びアドホックネットワークを構築するシステムを提案し, 動的なリンク切り替えを実現する手法について考察, プロトタイプシステムを実装・構築することでその有効性を検証した.

今後の展望として, 物理的に距離の離れた 3 拠点間をオーバーレイ方式の SDN で接続するコグニティブ無線ルータを開発し, コグニティブ無線ネットワークのテストベッドとして活用できるようにするとともに, 本稿のプロトタイプシステムをベースとした無線アドホックネットワーク構築システムをより実環境を想定した調整を行っていくことで, 被災地における実運用化を目指していく.

参考文献

- 1) Yoshitaka Shibata, Daisuke Nakamura, Noriya Uchida, Kazuo Takahata, "Residents Oriented Disaster Information Network"(IEEE Proc on SAINT'2003, pp. 317-322)(January 2003).
- 2) Daigo Sakamoto, Koji Hashimoto, Kazuo Takahata, Yoshitaka Shibata et al. ,"Performance Evaluation of Evacuation information Network System based on Wireless Wide Area Network" (DPS, 100-12) (November 2000).
- 3) Daisuke Nakamura, Noriki Uchida, Hideaki Asahi, Kazuo Takahata, Koji Hashimoto, Yoshitaka Shibata "Wide Area Disaster Information Network and Its Resource Management System"(AINA'03)(March 2003).
- 4) 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"(情報処理学会) (2009)
- 5) 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, 岩手県立大学ソフトウェア情報学研究科(DPS 研究会 159)(2011)
- 6) J. Mitola III, G. Q. Maguire. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. (IEEE Personal Communications) (August 1999).
- 7) Trema (<http://www.trema.info/>)
- 8) Open vSwitch (<http://openvswitch.org/>)