Vol.2010-DPS-142 No.41
Vol.2010-CSEC-48 No.41
2010/3/5

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†

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．

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

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-DPS-142 No.41
Vol.2010-CSEC-48 No.41
2010/3/5

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					○	◎	
	行政情報					○	◎	
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．

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 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．

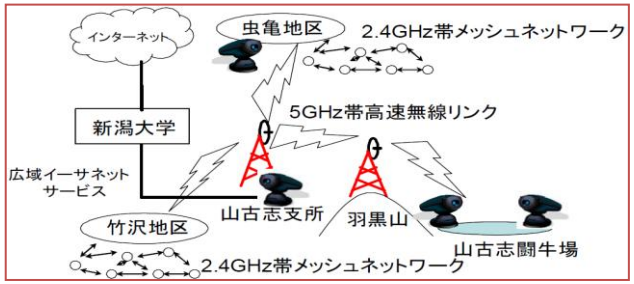

図１　山古志ねっとのネットワーク構築
Figure 1　System Configuration of Yamakoshi Net

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

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-DPS-142 No.41
Vol.2010-CSEC-48 No.41
2010/3/5

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．

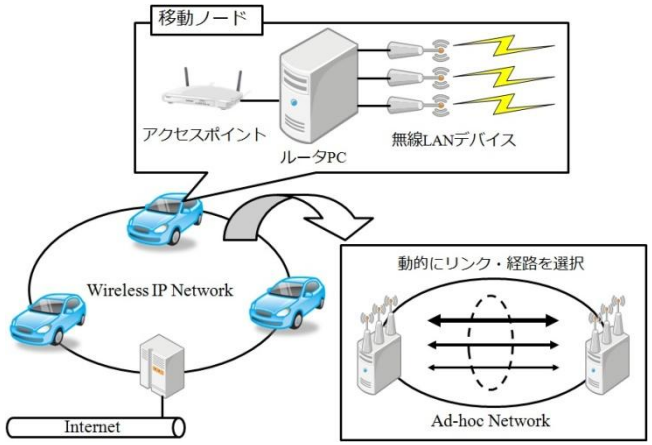

図２　システム概要図
Figure 2　System Configuration

4.2 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．

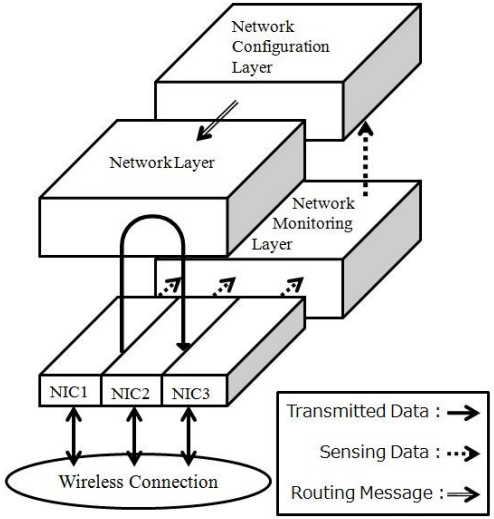

図３　システムアーキテクチャ
Figure 3　System Architecture

Network 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 として上位層の Network Configuration Layer に渡される．

Network Configuration Layer 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，無線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．選択されたリンクは，Routing Message によりルーティングテーブルの該当 NIC のメトリック値を書き換えることで擬似的にアクティベートする．

本システムにおける Network Layer は，通常のデータパケットである Transmitted Data のルーティング機能を担う．ルーティングアルゴリズムには OSPF に代表されるリンクステート型のものを利用する．

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-DPS-142 No.41
Vol.2010-CSEC-48 No.41
2010/3/5

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．

5.1 リンク選択

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．

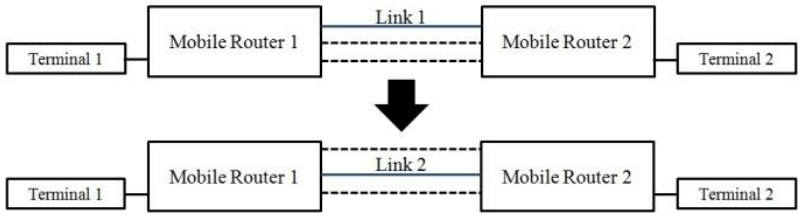

図 4　隣接ノード間のリンク選択
Figure 4　Link Selection Method

リンク選択はルータ PC 間で執り行われる．ルータ PC は，定期的に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することでリンク性能の変化を察知する．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．

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 Mobile Router 2 へ, 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．

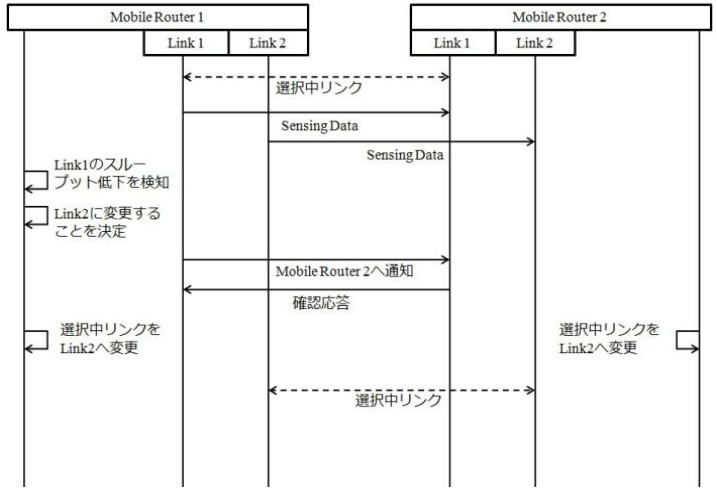

図 5　リンク選択におけるメッセージフロー
Figure 5　Message Flow of Link Selection

5.2 ルート選択

全ての隣接ノード間でリンク選択が完了した後，ルート選択のフェーズに入る．送信元ホストと宛先ホスト間に存在するすべてのルートをリストアップし，それぞれでエンド間のネットワーク性能を計測する．計測された値と，ユーザからのネットワークへの要求を考慮し，最終的に最適な通信経路を一つ選出する．これらのフェーズを経ることにより，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. ルート選択は, 以下のアルゴリズムに基づいて実装される．

1. エンド間の経路におけるネットワーク性能を，定期的なパケットフラッディングによって把握する．
2. Mobile Router 2 は Mobile Router 3 との間のリンク全てのスループットが著しく低下，もしくはリンクできない状態になったことを検知．
3. Mobile Router 2 は代替経路として Mobile Router 4 とのリンクを使用することを決定する．
4. Mobile Router 2 は Mobile Router 4 に接続リクエストとリンクチャネルについてのパラメータを含んだメッセージを発行する．1
5. Mobile Router 4 は Mobile Router 2 に確認応答メッセージを発行する．
6. それぞれの Mobile Router 間でルーティング情報を適切に書き換えることで, 不必要なリンクを排斥する．

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-DPS-142 No.41
Vol.2010-CSEC-48 No.41
2010/3/5

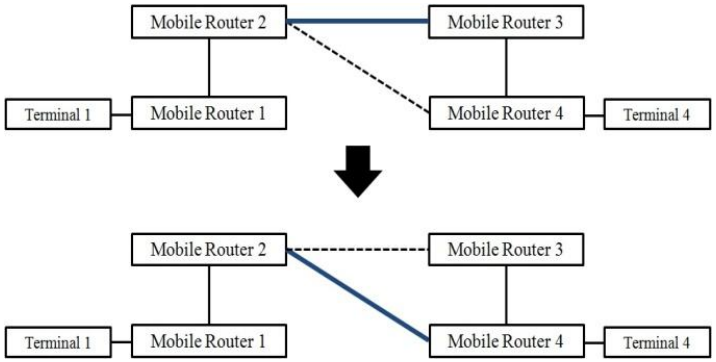

図６　中継するモバイルルータの選択
Figure 6　Mobile Router selection method

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) ２台と Terminal PC (TPC) ２台を，IEEE802.11g (54Mbps モード)，IEEE802.11b (11Mbps モード), IEEE802.11b (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[2]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，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，NetCOBRA System(Network COst Based Routing Assist System)と名付けた．

本プロトタイプに実装する無線 LAN ユニットは，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．

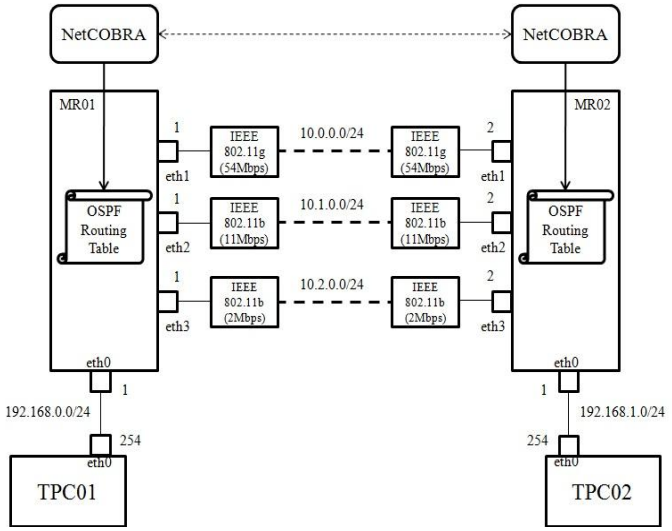

図７　プロトタイプシステムのネットワーク構成図
Figure 7　Prototype System Network Configuration

実際に構築したプロトタイプシステムの機器構成外観を図８に，無線 LAN ユニット拡大画像を図９に示す．

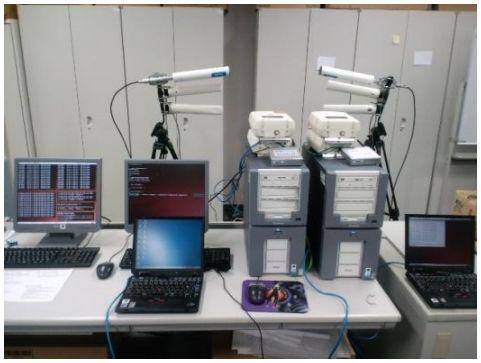

図８　プロトタイプシステム機器構成外観
Figure 8　Prototype System Device Configuration

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-DPS-142 No.41
Vol.2010-CSEC-48 No.41
2010/3/5

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

これらの無線 LAN ユニットは 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．

NetCOBRA System の性能評価を行うため，本システムの実証実験を先駆けて行った．本実証実験は，OSPF の経路決定要素であるコスト値を外部プログラムから動的に変更することによって，複数装備された NIC のうち実際にパケットの送出される NIC を操作することが可能であることを実証することを目的とする．これにより，コスト値の算出時にネットワークのパフォーマンスを考慮するような独自のプログラムを本システムに組み込むことで，ネットワーク状態に基づいた最適な経路を選択することができるようになるといえる．NetCOBRA System における OSPF のコスト値書き換えは，実装したプログラムが自動生成するシェルスクリプト（図１０）を介して行われる．本シェルスクリプトのコスト値書き換えにより，経路変更を容易に行うことが可能であることが実証された．

次に，本システムの基礎データを収集するための性能評価実験を行った．評価項目は以下の４つ．

1. コスト値の書き換え処理(シェルスクリプト生成と実行)にかかる時間
2. コスト値を書き換えてから実際に経路が切り替わるまでの時間
3. 経路切り替え時の実効スループットの変化
4. 経路切り替え時のパケットロス率の変化

評価用に実装したプログラムにより有線で結線されたプロトタイプシステム上で周期的にリンク切り替えを発生させ，その時の処理時間，実効スループットやパケットロス率の変化を測定し，グラフ（図１１，１２）にまとめた．

```
#!/bin/zsh
zmodload zsh/zpty
local a
zpty quagga telnet localhost 2604
zpty -r quagga a "*: "
zpty -w quagga "zebra"
zpty -w quagga "enable"
zpty -w quagga "configure terminal"
zpty -w quagga "interface eth1"
zpty -w quagga "ospf cost 1"
zpty -w quagga "exit"
zpty -w quagga "interface eth2"
zpty -w quagga "ospf cost 10"
zpty -w quagga "exit"
zpty -w quagga "interface eth3"
zpty -w quagga "ospf cost 10"
zpty -w quagga "exit"
zpty -w quagga "copy running-config startup-config"
zpty -w quagga "exit"
zpty -w quagga "exit“
while zpty –r quagga a;
do
result+=$line
done
zpty–d quagga
print $result
```

図１０　自動生成されるシェルスクリプトの例
Figure 10　Auto Generated Shell Script

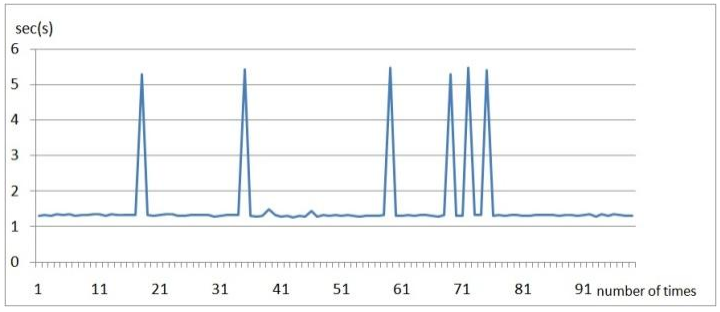

図１１　スクリプト生成・実行にかかる処理時間
Figure 11　Processing Time

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-DPS-142 No.41
Vol.2010-CSEC-48 No.41
2010/3/5

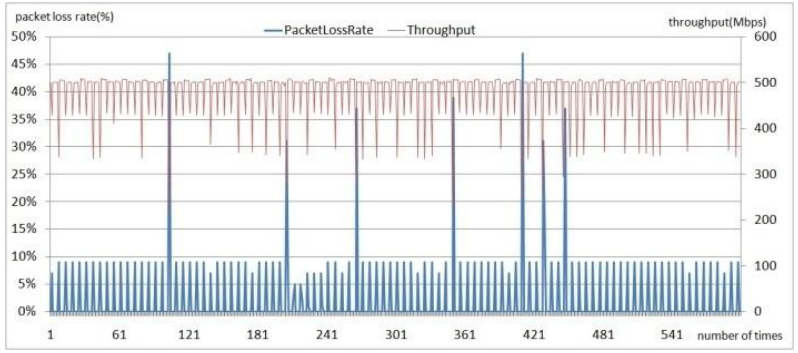

図１２　リンク切り替え発生時のネットワーク性能の変化
Figure 12　Network Capability

リンク切り替えにかかる平均処理時間は約 1.3sec，その時の実効スループット低下は平均して約 60Mbps，パケットロス率は 8%ほどとなった．一方で，イレギュラーな値が数カ所観測されているが，これは Quagga により稼働しているルーティングプロセスにおいて経路の収束が著しく遅延する場合に再現することがわかっている．今後，さらに Quagga のシステム全体の挙動やデータフローに対する理解を深めることで，この問題を解決する事につながると考えている．

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・NetCOBRA 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 NetCOBRA System として開発した．NetCOBRA 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，リンク間の実効スループットに基づき OSPF のコスト値を動的に書き換える NetCOBRA 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した．しかしながら，現在の NetCOBRA System におけるリンク間実効スループットの測定には iperf を利用しており，ネットワーク帯域の圧迫が問題となっている．この問題を解決するために，今後はパケットペアによる比較的ネットワーク帯域の圧迫が少ない実効スループット推定手法を実装することを検討している．

また，本稿では触れていなかったがリンク・経路切り替えについての意思決定手法についても今後検討を進めていく必要がある．統計学的な意思決定手法である AHP(Analytic Hierarchal Process)の概念を取り入れることで，最適な切り替え手法を模索していく．

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] 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
[4]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)
[5]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)
[6] Chang Woo Pyo,MikioHasegawa：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.
[7]Quality of Service Routing for Real-Time Applications using the AnalyticalHierarchy Process, AlbaraAwajan, Khalid Al-Begainand Paula Thomas.DOI10.1109/UKSIM.2008.98
[8]Design and Implementation of a Context-Aware DecisionAlgorithm for Heterogeneous Networks,TansirAhmed,KyandoghereKyamakya,Markus Ludwig,SAC’06, April, 23-27, 2006, Dijon,France.
[9] QuaggaRouting Suite：http://www.quagga.net/Using Parallel Wireless Links and Path Diversity, Published online: 22 April 2008
[10]Quagga Routing Suite：http://www.quagga.net/

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan