

SDN 技術を基盤とした 災害に強いコグニティブ無線システムの開発

佐藤剛至^{1,a)} 内田法彦^{2,c)} 柴田義孝^{1,b)}

東日本大震災におけるネットワークの復旧には、衛星通信、3G、WiFi などの無線通信技術が利用され、効果を発揮した。しかし、それぞれのネットワークは個別に導入されたため協調的な利用を想定しておらず、特定のアクセス網に負荷が集中するなど、ネットワークリソースの非効率的な利用が問題であった。本研究では、衛星通信や無線 WAN 等の複数のインターネットアクセス網を、コグニティブ無線技術を用いて統合し、選択的に利用することで、災害時における各拠点の冗長的なインターネットアクセス手段を確保する。ネットワーク性能の変化を常に監視し、拡張 AHP によって評価することで、利用するインターネットアクセス網を決定する手法を提案し、OpenFlow を用いてプロトタイプシステムを実装することで基本的な性能の評価を行った。

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。実際に、東日本大震災においては、衛星通信システムの投入や携帯電話各社の移動通信車による 3G 通信によって被災地とのコミュニケーションを復活した。しかしながら、被災地の通信復旧に活躍したこれらのネットワークは、それぞれ単独で導入されたため利用できる端末が限定され、利用中のアクセス網の状態が輻輳などによって変化した場合であっても、各アクセス網間のハンドオーバーを行うことができないといった問題がある。

そこで本稿では、WiMAX や LTE、3G 携帯電話網、衛星通信網などの特性の違う無線アクセス網を 1 台のデバイスに収容し、各アクセス網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の監視結果に基づきパケットを流すアクセス網を選択する事が可能なコグニティブ無線システムを提案する。

本システムが提供する重層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、しぶとく通信を続けることが可能になるとともに、コグニティブ無線システムが自動的に余裕のあるアクセス網へハンドオーバーを行うため、利用可能なネットワーク資源を有効に活用することが可能となる。

我々は、SDN 技術を用いて実装したコグニティブ無線プロトタイプシステムに、WiMAX や LTE、3G 携帯電話網、衛星通信網を収容し、岩手県の滝沢市、宮古市、釜石市の 3 地点に配置することでシステムの機能と性能を評価するためのテストベッド環境を構築した。

2. 背景と目的

東日本大震災においては、衛星通信システムの投入や携帯電話各社の移動通信車による 3G 通信によって被災地とのコミュニケーションを復活した。しかしながら、被災地の通信復旧に活躍したこれらのネットワークは、それぞれ単独で導入されたため利用できる端末が限定され、利用中のアクセス網の状態が輻輳などによって変化した場合であっても、各アクセス網間のハンドオーバーを行うことができないといった問題がある。

この問題を解決するための技術として、コグニティブ無線技術[[1]]が利用できると考える。もともとコグニティブ無線技術は、空きのある無線周波数帯を利用するためのものであるが、本研究では複数の無線通信方式を、その時々通信状況において最適なものに自動的に切り替えるために用いることで問題の解決を目指す。

本研究の目的は、複数の無線アクセス網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、利用可能なネットワーク資源を有効に活用するコグニティブ無線システムの構築である。本システムの構築により、テキストデータの通信経路を衛星通信網へ迂回させ、高速な通信網をビデオチャットデータ優先としたり、VoIP 通信のために、可能な限り低遅延なアクセス網を選択し提供したりといった QoS 制御が可能となる。

3. システム構成

3.1 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、複数の無線アクセス網を収容したコグニティブ無線スイッチと、それらを集中的に管理するコグニティブ無線コントローラで構成される。

コグニティブ無線スイッチは、収容しているそれぞれの無線アクセス網毎に定期的にネットワーク性能の監視を行っており、監視結果は随時コグニティブ無線コントローラへ蓄積されている。コグニティブ無線コントローラは、随

1 岩手県立大学
Iwate Prefectural University, Japan.

2 埼玉工業大学
Saitama Institute of Technology, Japan.

a) g236l001@s.iwate-pu.ac.jp

b) shibata@iwate-pu.ac.jp

c) uchida@sit.ac.jp

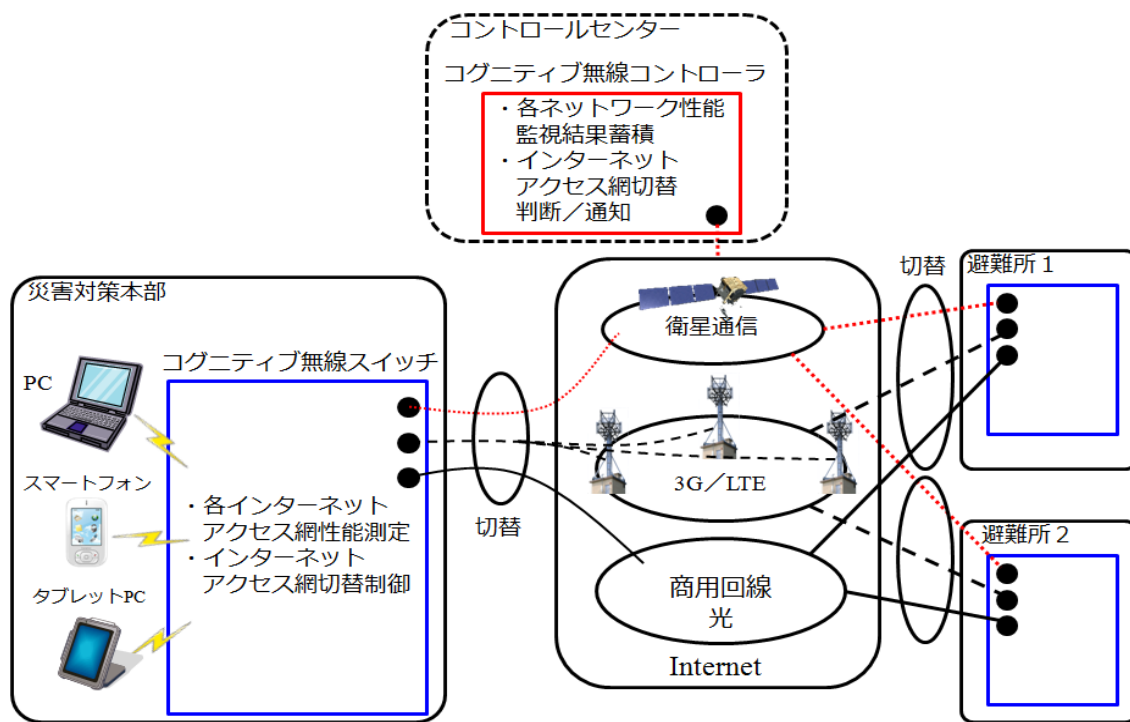


図 1 システム概要図

時蓄積される各地点のネットワーク監視結果を元に、アクセス網に対する重み付けを行うことで選択するアクセス網を判断する。コントローラとスイッチ間の SDN 制御用のチャネルとして衛星通信網を利用しており、各スイッチはネットワークに参加している端末がやりとりするパケットについて、どのアクセス網に送出するかをコグニティブ無線コントローラからの命令で判断する。

本システムは以下の提案手法と要素技術で構成される。

1. ネットワーク性能監視技術
ネットワーク性能の変化を検知する
2. 監視結果に基づいたアクセス網選択手法（提案手法）
スイッチ毎の各アクセス網に重み付けを行う
3. OpenFlow によるパケット制御技術
アクセス網切替制御を行う

4. ネットワーク性能監視技術

本システムはネットワーク性能の変化を検知するために、一定間隔でコグニティブ無線スイッチと、本システム用にインターネット上に配置したネットワーク計測用のサーバ間でネットワーク性能の測定監視を行う。測定する対象は以下の3つである。

- スループット
- 遅延時間
- パケットロス率

スループットを測定する手法には、パケットが通過するルータに計測機能を実装することで算出する **Passive** 方式と、計測するエンド端末間でプローブパケットをやりとりして計測する **Active** 方式がある。このうち、**Passive** 方式はパケットが通過するすべてのルータに計測機能を実装でき

ることが前提となるため、複数の管理主体からなるインターネットを介する本システムでは実現が困難である。よって本システムでは **Active** 方式を採用する。**Active** 方式のスループット測定手法には、iperf に代表される大量のパケット挿入による可用帯域幅測定手法と、pathchirp[2]に代表されるパケットトレイン方式による可用帯域幅推定手法がある。この内、iperf のように大量のパケットを挿入する方式では、本システムで構築するコグニティブ無線スイッチによって提供されるネットワークそのものに影響を与えてしまうため、本システムではパケットトレイン方式によるスループット監視を採用する。

遅延時間の計測には、広く利用されている ping ツールをスイッチ-計測サーバ間で一定時間実行し、取得されたラウンドトリップタイム値の平均をもとに遅延時間を測定する。

パケットロス率についても同様に、ping ツールをスイッチ-計測サーバ間で一定時間実行し、応答が返ってこなかった割合をパケットロス率とする。

5. アクセス網選択手法

5.1 提案手法概要

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、実効スループット、ラウンドトリップタイム、パケットロス率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、後述する拡張 AHP によって各アクセス網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網を決定する。

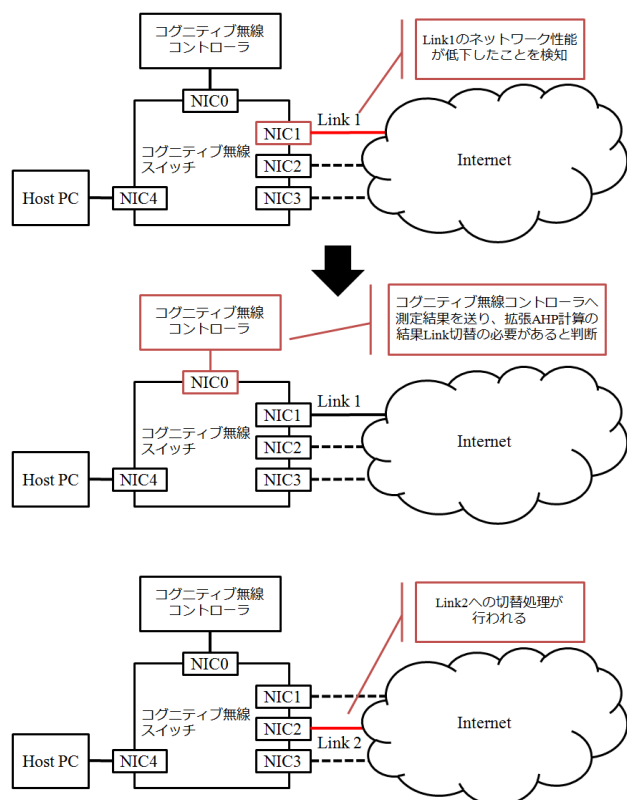


図 2 アクセス網選択手法概要

5.2 AHP 法概要

アクセス網切り替え時における意思決定に用いる AHP についてここで詳述する。AHP は意思決定法の一つで、複雑な決定を行う際に利用される構造的な手法であり、Thomas L. Saaty[3]らによって 1970 年代に提唱された。AHP においては、決定問題の構造化を行うことで、要素の定量化と代替案の評価が可能である。その計算過程は、問題の階層化、評価基準の対比較評価、代替案の対比較評価、総合値の算出の順で行われる。

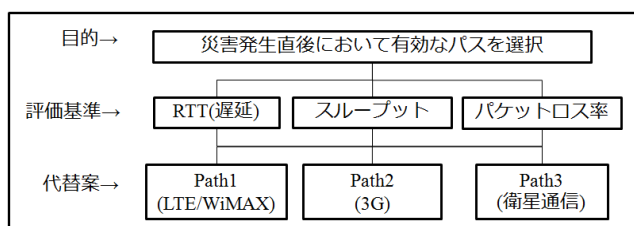


図 3 AHP の階層例

例えば、図 3 は、本稿における AHP による階層化の例であり、AHP によって隣接したノード間で最適な無線リンクを選択する場合である。AHP による問題解決を行う場合には、まず問題の階層化を行う。本研究では、特にユーザ要求等のポリシーを考慮することで、「接続性を確保する状態で最適な無線リンクを選択する(災害発生直後において有効)」あるいは「ビデオ通信において最適な無線リンクを選択する(災害沈静化後において有効)」などの目的を設定する。次に評価基準では、ユーザ要求に最も適したリンクを選択するために、適切なネットワーク状態量(スループット

ト、遅延、パケットロス率(PER)等)を設定し、後述する評価基準の対比較評価により優先度を決定していく。そして代替案では各種無線アクセス網の計測値から優先度を決定する。

階層化がなされた後、AHP では、評価基準の優先度を算出する。例えば、スループット、遅延などのネットワーク性能に関する評価基準における優先度の算出方法を以下に述べていく。評価基準の個数を n とし、それぞれの重み(weight)を $w_1, w_2, \dots, w_n$ とすると、各要素における対比較は $a_{ij} = w_i/w_j$ と表現される。また、これらの対比較は以下の対比較行列 A のように表現できる。

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_1}{w_j} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{w_i}{w_1} & \dots & \frac{w_i}{w_j} & \dots & \frac{w_i}{w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{w_n}{w_1} & \dots & \frac{w_n}{w_j} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

そして正規化された行列 A_{norm} は以下のように表現できる。

$$A_{\text{norm}} = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1j} & \dots & b_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{i1} & \dots & b_{ij} & \dots & b_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & \dots & b_{nj} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (3)$$

また、評価基準における各優先度 p_i は次の方程式により算出される。

$$p_i = \frac{\sum_{l=1}^n b_{il}}{n} \quad (4)$$

このとき、各評価基準の重み w_n は対象ユーザ要求を考慮して 1-9 段階の重みが決められており、対比較評価 a_{ij} や優先度 p_i の計算に用いられる。例えば、本研究におけるユーザ要求を考慮した各目的別の評価基準に関する表を以下に示す。

表 1 評価基準における対比較行列例

Goal1(Video 優先)	PER	RTT	スループット
PER	1	3	1/2
RTT	1/3	1	1/5
スループット	2	5	1
Goal2(VoIP 優先)	PER	RTT	スループット
PER	1	1/2	3
RTT	2	1	5
スループット	1/3	1/5	1

Goal3(Text 優先)	PER	RTT	スループット
PER	1	5	5
RTT	1/5	1	1
スループット	1/5	1	1

したがって、(1)~(4)により各 Goal に対する評価基準の優先度 $p_1 \sim p_4$ は表 3 のようになる。

表 2 評価基準の優先度結果

目的	PER	RTT	スループット
Goal1(Video 優先)	0.3092	0.1096	0.5813
Goal2(VoIP 優先)	0.3092	0.5813	0.1096
Goal3(Text 優先)	0.7143	0.1429	0.1429

続いて、代替案についても、評価基準と同様に重みを用いて評価基準ごとに優先度が計算される。しかしながら、次節で述べるように本稿においては代替案の優先度計算において、無線ネットワーク状態の環境変化を考慮するため、Packet Train 法を用いた実効スループットや遅延時間などのネットワーク状態の計測値を利用して重み w_n を算出し、各代替案の優先度計算に適用する。

それから、AHP においては各評価基準と各代替案の優先度を用いて総合値の計算がおこなわれる。総合値は、各評価基準の重みと対象の代替案の優先度の積を計算し、それらの総和によって求めることができる。そして、算出された代替案の総合値の大きいものが、最適な無線アクセス網として選択される。

5.3 拡張 AHP 法

本研究においては、AHP をコグニティブ無線デバイス上の無線アクセス網決定に使用するため、以下の拡張機能を導入する。

コグニティブ無線において、ネットワーク環境の外的要因もしくは移動に伴う状態変化に対応するため、代替案の重みの算出にネットワーク状態の計測値を使用する。各代替案の重みを S_i とし、 u_i を各代替案の上限値、 l_i を下限値、また、 n_i を計測期間の移動平均値とすると、RTT 及び PER については(5)式によって重みを求めることとする。また、スループットについては(6)式のように代替案のスケールが異なるため $u_{\max}$ が利用される。また、計測値の移動平均値は、計測による揺らぎを平滑化するため、 x_i を i 秒時のネットワーク計測値とすると、 $n_i = 0.6x_i + 0.3x_{i-1} + 0.1x_{i-2}$ によって値を求める。

$$S_i = \begin{cases} 1 - \frac{n_i - l_i}{u_i - l_i} & ; l_i < n_i < u_i \\ 1 & ; n_i \geq u_i \\ 9 & ; n_i \leq l_i \end{cases} \quad (5)$$

$$S_i = \left\lceil \frac{n_i - l_i}{u_{\max} - l_i} \right\rceil \times 10 \quad \text{但し } u_{\max} = \max(u_i) \quad (6)$$

但し $\lceil \cdot \rceil$ は小数第二位以下を四捨五入するという意味である。

例えば、評価基準(スループット)における代替案の一つが LTE の場合、計測値 $n_i = 5.2\text{Mbps}$ 、下限値 $l_i = 0\text{Mbps}$ 、測定履歴における最大値を例えば $u_{\max} = 24\text{Mbps}$ とすると、重みは、

$$S_{i\text{LTE}} = \left\lceil \frac{5.2 - 0}{24 - 0} \right\rceil \times 10 \approx 0.45 \quad (7)$$

として算出される。なお、この際適切な等間隔でスコアを配置するため四捨五入して 1 から 9 の整数値を以後の計算に適用する。そして、これらの値は前節(1)式の w_i と置き換えて計算され、同様にして各評価基準毎の優先度が算出される。表 4 はビデオ通信を目的にした場合のある時刻における平均値に基づいた代替案における一対比較行列の例であり、表 5 はその優先度の結果例を示す。

表 3 ビデオ通信時における代替案の一対比較行列例

PER	衛星通信	LTE	3G
衛星通信	1	1/2	1/2
LTE	2	1	1
3G	2	1	1
RTT	衛星通信	LTE	3G
衛星通信	1	1/5	1/3
LTE	5	1	2
3G	3	1/2	1
スループット	衛星通信	LTE	3G
衛星通信	1	1/6	1/2
LTE	6	1	3
3G	2	1/3	1

表 4 代替案の優先度結果

	PER	RTT	スループット
衛星通信	0.2	0.1096	0.1137
LTE	0.4	0.5813	0.6647
3G	0.4	0.3091	0.2216
目的			
Goal1(Video 優先)	0.2346	0.0819	0.4480

最後に、評価基準と代替案の優先度の結果を用いて総合値の計算を行う。総合値の算出では、表 3 の評価基準の優先度に表 5 の各代替案の優先度を乗じて総和をとることで表 6 のような総合値の表が作成される。

表 5 総合値結果

Goal 1	PER	RTT	スループット	総合値
衛星通信	0.0618	0.0121	0.0661	0.1399
LTE	0.1237	0.0637	0.3864	0.5737
3G	0.1237	0.0339	0.1288	0.2863

最終結果として、ビデオ通信を目的とした場合、表 6 の総合値で比較すると、LTE > 3G > 衛星通信 であることから、最適な無線リンクは LTE を用いた代替案であることが決定される。このように周期的にネットワーク状態を計測して移動平均値を計算し、これに基づく総合値を計算することにより常にネットワーク性能に即した最適なアクセス網を選択し続けることが可能となる。

6. OpenFlow によるパケット制御技術

本システムでは、選択されたアクセス網にパケットを流すために SDN 技術の一つである OpenFlow[4]を用いる。OpenFlow では OpenFlowSwitch から発信される各種メッセージを OpenFlowController が受け取り、対応するイベントを実行することで処理を行うイベントドリブン方式の実装が一般的である。本システムで利用する主なイベントを以下に示す。

- switch_ready
OpenFlowSwitch と OpenFlowController 間のリンクが確立した際に呼び出される
- feature_reply
OpenFlowSwitch の情報を取得するための feature-request メッセージへの返答を受け取った際に呼び出される
- access_change
提案手法により、選択中のアクセス網を変更する必要があると判断された場合に呼び出される。内部では、OpenFlow プロトコルにおける Flow Mod 命令を switch に対して発行する。

これらのイベントの組み合わせによりパケットの流れを制御する。OpenFlowController と OpenFlowSwitch 間のメッセージフローは以下の通りである。

最初に OpenFlowSwitch は、OpenFlowController にネットワークへ参加したことを通知するための Switch_Ready メッセージを発行する。次に Switch_Ready メッセージを受け取った Controller は、新規に Switch が参加したことを検知し、Switch に対して Switch 自身の情報を通知するよう要求するメッセージを発行する。Switch 自身の情報には、Switch ID、アクセス網収容数、装備 NIC の MAC アドレス等がある。Switch 自身の情報を Controller へ通知することで、初期化シーケンスが完了となる。

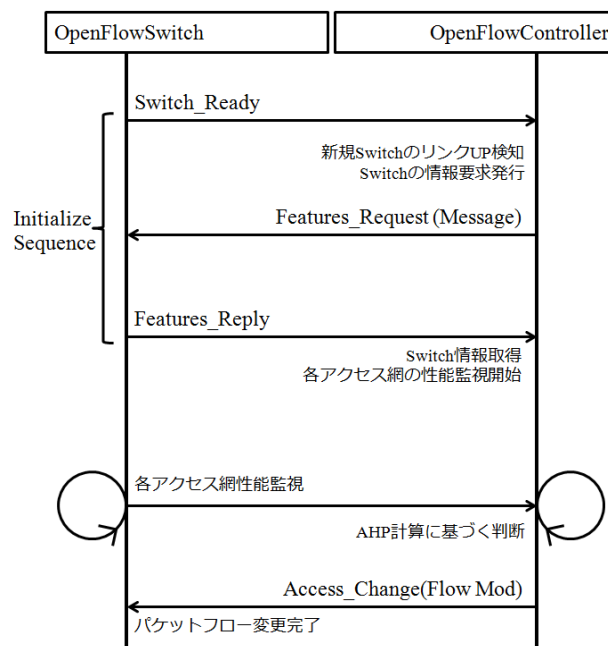


図 4 メッセージフロー

初期化された Switch から順に、収容しているアクセス網の性能監視をスタートし、随時 Controller へ監視結果を通知する。蓄積された監視結果に基づき、拡張 AHP 計算を行うことで Controller がアクセス網切替の必要ありと判断した場合、対象 Switch に Flow Mod メッセージを発行することでパケットフローの制御を実現する。

7. システムアーキテクチャ

本システムは、OpenFlowSwitch と OpenFlowController の 2 種類で構成されており、それぞれアーキテクチャを図 3 に示す通りである。

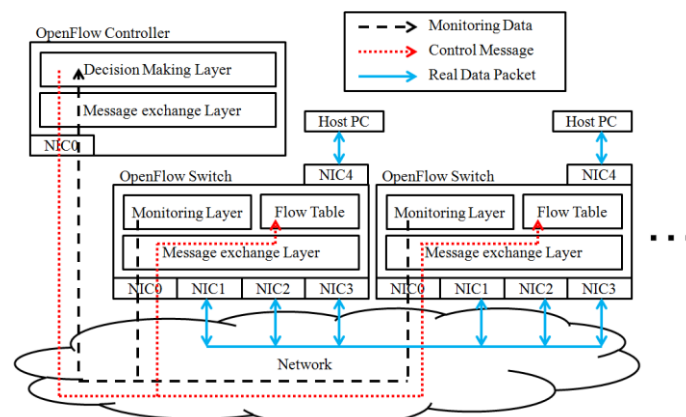


図 5 システムアーキテクチャ

OpenFlowSwitch は、Message Exchange Layer, Monitoring Layer, FlowTable の 3 つのコンポーネントで構成される。Message Exchange Layer は、OpenFlow メッセージの送受信とネットワーク性能監視結果の送信を行う。OpenFlow メッセージのやり取りは、OpenFlowSwitch ソフトウェアが担う。

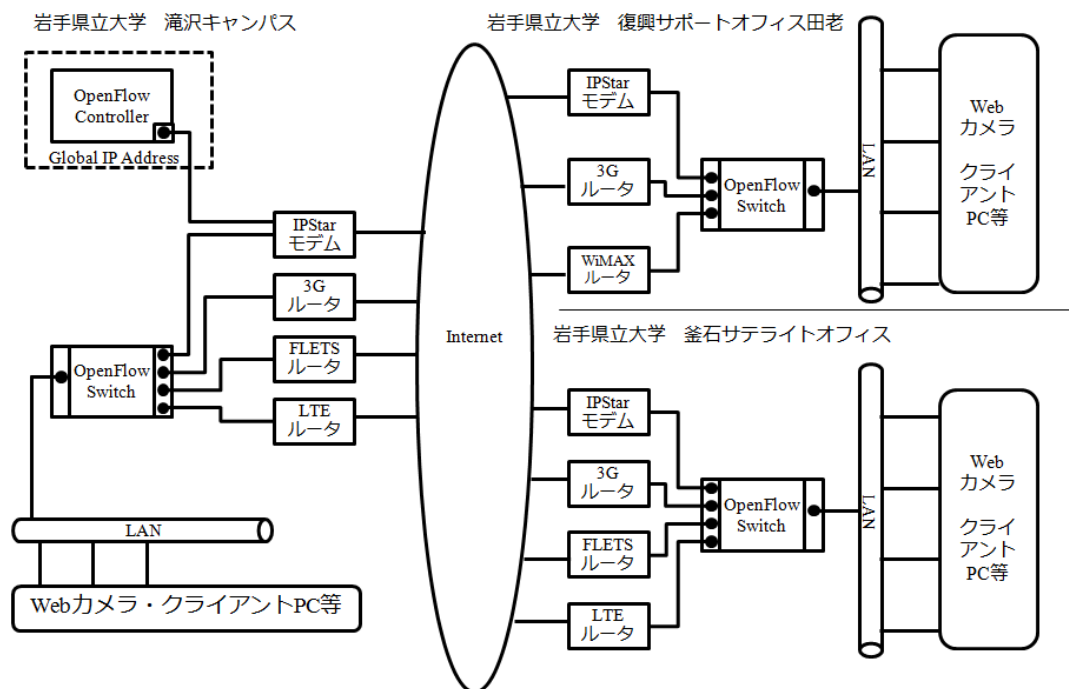


図 6 プロトタイプシステム構成図

Monitoring Layer はネットワーク性能の監視を行う。Flow Table は OpenFlow のスタックに内蔵されるコンポーネントであり、OpenFlowController からの命令によってパケットのフローを定義する。

OpenFlowController は、Message Exchange Layer と Decision Making Layer の 2 つのコンポーネントで構成される。Message Exchange Layer は、OpenFlowSwitch のものと同じく OpenFlow メッセージの送受信とネットワーク性能監視結果の受信を行う。OpenFlow メッセージのやり取りは、OpenFlowController フレームワークが担う。Decision Making Layer では、蓄積された各 Switch のネットワーク性能監視結果に基づき拡張 AHP による優先度付けを行い、判断結果を各 Switch へ通知する。この操作により、各 Switch の Flow Table が更新される。

8. プロトタイプシステム

8.1 システム構成

本システム及び提案手法を評価するためのプロトタイプシステムについて説明する。

本プロトタイプシステムは、緊急時において物理的に離れた地点間の通信を確保し、動的にアクセス網を切り替えていくことが可能であることの実証と評価を目的として構築する。よって我々は、図 1 に示すように、岩手県内の内陸（滝沢市）・沿岸北部（宮古市田老）・沿岸南部（釜石市）の 3 拠点にプロトタイプシステムを構築する。

各拠点には、本システム用に各種無線アクセスデバイスを装備した OpenFlowSwitch を配置する。本プロトタイプシステムで使用する無線アクセス網は次の通りである。

- 衛星通信網（IPStar）
- 3G/LTE 網（docomo/au/softbank）
- WiMAX 網
- FTTH 網

各 OpenFlowSwitch を、OpenFlowController と OpenFlow プロトコルで制御するために OpenFlow チャネルを用意する必要がある。そのため各 OpenFlowSwitch は滝沢キャンパスに配置した OpenFlowController の IP アドレスに対して TCP 接続を行えるようにネットワーク設定を予め行う。また、OpenFlow チャネルは常に開いておく必要が有るため、制御用の回線として衛星通信網を利用する。

OpenFlowSwitch には、LAN 用の port を用意しており、この port から流れてきたパケットはすべて OpenFlow で制御され、特定のアクセス網へのフロー制御を行っている。

8.2 デバイス構成

本プロトタイプシステムを構成するデバイスについて説明する。

OpenFlowController は、OpenFlowController フレームワークの一つである Trema[5]を用いて実装した。Trema は Linux OS 上でのみ動作するフレームワークのため、OpenFlowController のデバイスは Linux OS をインストールした PC である。OpenFlowSwitch は、Linux PC を OpenFlowSwitch 化するソフトウェアである openvswitch[6]を用いるため、OpenFlowController と同じくデバイスは Linux OS をインストールした PC である。ただし、OpenFlowSwitch は複数の無線アクセス網を収容するため、物理 NIC を拡張する必要がある。本プロトタイプシステムでは、図 2 のように USB 接続によって物理 NIC を拡張するデバイスを用いて実現している。



図 7 OpenFlowSwitch デバイス構成

9. 性能評価

本プロトタイプシステムにおいて、OpenFlow による無線アクセス網の切替にかかる時間を計測する。前章のプロトタイプシステム評価のためのテストベッドは現在構築中であるため、本章の性能評価を行うための環境を以下のように別途構築した。

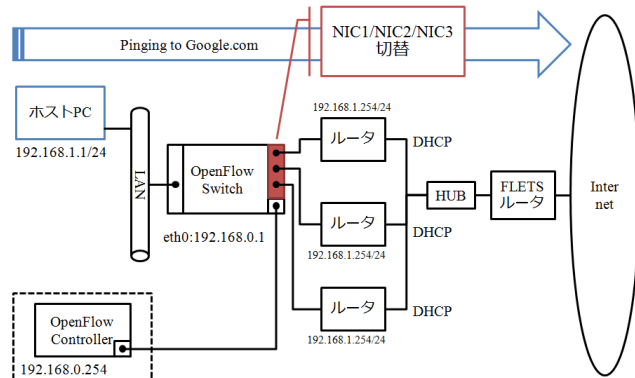


図 8 性能評価環境

本性能評価では、特別な処理を行わず、単に OpenFlow プロトコルによってパケットフローを切り替えた場合などの程度の切替時間が発生するかのみを計測する。正確な切替時間を計測するには、OpenFlow チャンネルの遅延などを限りなく 0 に近づける必要が有るため、Controller と Switch はイーサネットケーブルで直接接続を行っている。これは、OpenFlow の構造上データプレーンを担う OpenFlowSwitch は非常に単純な機構で動作しており、OpenFlowSwitch 上においては Flow mod のタイミングや Flow 書き換え処理完了タイミングをイベントなどで取得することができないため、切替時間を計測するプログラムは OpenFlowController 上に実装する必要があるためである。

切替時間の計測には、まず OpenFlowController 側において Flow Mod メッセージの発行タイミングでタイマーをスタートし、同時に Barrier Request メッセージを発行する。そして OpenFlowSwitch からの Barrier Reply メッセージを受け取った時点でタイマーをストップすることで、切替時間を計測することが可能となる。

用意した性能評価環境において上記の切替時間計測プロ

グラムを実装し、10 秒間隔で 100 回切替を発生させた時の最大／最小／平均切替時間を計測した結果は以下の通りである。

表 6 切替処理時間

	最大	最小	平均
切替時間	196ms	67ms	80ms

最大値が正規分布を大きく外れたのは、OpenFlowSwitch のデバイスとして、視覚的なデモを行うためにウィンドウマネージャ等がバックグラウンドで動作する Linux マシンを使用しているため、OS レベルでのプロセス割り込み等の制御により処理時間が増加したものである。より安定した稼働のためには、バックグラウンドプロセスを可能な限り減らすか、もしくは OpenFlowSwitch 専用機を導入することが必要であると考え。

10. まとめ

本研究では、SDN 技術を用いて実装したコグニティブ無線システムに、WiMAX や LTE, 3G 携帯電話網、衛星通信網を収容し、岩手県の滝沢市、宮古市、釜石市の 3 地点に配置したプロトタイプシステムを実装することで、システムの機能と性能を評価するためのテストベッド環境を構築した。今後は、ネットワーク性能監視モジュール、及び提案手法である拡張 AHP モジュールのを速やかに実装し、現在手動で行っている切替を自動的に行えるように改良することで、提案手法の評価を実施する。その上で、構築したプロトタイプシステムを常時岩手県内 3 拠点で稼働させ改良を重ねていくことで、実用に耐えるシステムを目指していく。

参考文献

- [1] J. Mitola III, G. Q. Maguire. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. (IEEE Personal Communications) (August 1999).
- [2] Vinay J. Ribeiro, Rudolf H. Riedi, Richard G. Baraniuk pathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths Presented at Passive and Active Monitoring Workshop (PAM 2003), 4/6/2003-4/8/2003, San Diego, CA, US
- [3] T. L. Satty. "How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process", European Journal of Operational Research, vol48(1990)
- [4] OpenFlow (<https://www.opennetworking.org/>)
- [5] Trema (<http://www.trema.info/>)
- [6] Open vSwitch (<http://openvswitch.org/>)
- [7] Yoshitaka Shibata, Daisuke Nakamura, Noriya Uchida "Residents Oriented Disaster Information Network"(IEEE Proc on SAINT'2003, pp. 317-322)(January 2003).