

OpenFlow をベースとした災害情報ネットワークにおける リンク切り替え技法の実現に関する研究

関野雄人^{†1} 柴田義孝^{†2} 内田法彦^{†3} 白鳥則郎^{†4}

災害発生直後のインフラは、救助活動や安否確認に使用され、非常に重要である。また、無線ネットワークは有線ネットワークと比較して、移動性や可搬性などの点について優れている。本研究ではこれまでに、IEEE802.11b, g, jなどの無線LANシステムを利用して、可用性や耐故障性に優れた災害情報ネットワークを構築し、その有効性の検証を行ってきた。本稿では、無線をベースとした災害情報ネットワークシステムの構築に、次世代ネットワーク制御技術である「OpenFlow」を新たに導入し、通信環境の変化に柔軟に対応できるネットワークの構築を提案する。我々は複数の異種規格無線ネットワークを通信環境の変化に柔軟に対応して切り替えるアドホックネットワークを設計・実装し、プロトタイプシステムを構築することで本システムの機能と性能を評価した。

Research on the Implementation of Link Switching Method in Disaster Information Network Based on OpenFlow Framework

YUTO SEKINO^{†1} YOSHITAKA SHIBATA^{†2}
 NORIKI UCHIDA^{†3} NORIO SHIRATORI^{†4}

Infrastructure after a disaster is very important because it is used to confirm the safety and rescue operations. In this paper, we propose to build a network that can respond flexibly to changes in the communication environment. This network consists of a network node to accommodate the existing wireless LAN system (ieIEEE802.11b, g, j, n), and satellite communications. Among multiple links, after selecting the best link in consideration of network performance of the network communication path is determined by calculating a route to satisfy the user request further. We evaluate the functionality and performance of the system by designing and implementing an ad-hoc network to switch to respond flexibly to changes in the communication environment standard multiple heterogeneous wireless networks, to build a prototype system.

1. はじめに

東日本大震災では、電気や水道などの他に情報通信インフラも大きな被害を受けた。災害直後の情報通信インフラは救助活動や安否確認、被災状況の把握のために非常に重要である。図1で示されるように、被災地で要求される情報は災害発生前後や経過時間とともに変化する。t3は被災直後を表し、ここではテキストベースの安否情報・被災状況などが求められる。t4は災害がある程度沈静化した状態を表し、VoIPなどによる音声情報による安否確認や、交通状況、ライフラインの状況、被災状況把握のための映像情報が必要とされる。災害発生直後に損傷した通信ネットワークは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、時間が経過するにつれて徐々に増加して

いく傾向にあり、災害発生直後から通信状況の変化に柔軟に対応し、要求に応じたネットワークサービスを提供する必要がある。

対象	要求項目\時期	t1	t2	t3	t4	t5	t6
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	ライフライン状況			◎	◎	◎	
	行政情報			◎	◎	◎	
	安否情報			◎	◎	◎	
	被災状況			◎	◎	◎	△
救援物資供給状況				◎	◎	◎	
				◎	◎	◎	

図1 被災地で要求される情報

本研究ではこれまでに、IEEE802.11b, g, jなどの無線LANシステムを利用して、可用性や耐故障性に優れた災害情報ネットワークを構築し、その有効性の検証を行ってきた。その中でも、複数の選択可能なリンクを有するコグニティブ無線ノードによってネットワークを構成し、実際に利用する状況に応じてリンクや経路をノード間のスループットや遅延、パケットロスレートに基づいて選択し、冗長化することでネットワーク全体の耐故障性の向上を目指した研究を行っていた[1]。また、各ノードにおいては、ス

†1 岩手県立大学大学院ソフトウェア情報学研究科
 Faculty of Software and Information science, Iwate Prefectural University
 Graduate School
 †2 岩手県立大学ソフトウェア情報学部
 Faculty of Software and Information science, Iwate Prefectural University
 †3 埼玉工業大学人間社会学部情報社会学科
 Department of Informational Society Studies, Saitama Institute of Technology
 †4 東北大学電気通信研究所
 Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University: Graduate
 School of Information Sciences, Tohoku University

クリプト言語ベースソフトウェアによる制御が行われていたが、リンクや経路の選択プロセスに時間を要し、高速な処理ができず、スループットの低下やパケットロスの増加といった問題点があった。またスクリプト言語機能の制限により大規模かつ統一したネットワーク制御が困難であった。

本研究では、無線をベースとした災害情報ネットワークシステムの構築に、次世代ネットワーク制御技術である「OpenFlow」を新たに導入する。各ノードは、ノードが持つ複数リンクを遅延やスループットといった通信環境の変化に基づいて使用するリンクを切り替えることで、通信環境の変化に柔軟に対応できるネットワークを実現する。

本研究では、性能の異なる3つのリンクによって接続された2台のネットワークノードと、それらのPCとコントロール用のリンクによって接続された1台の管理用PCがによってプロトタイプを構築した。

本研究では、各ノードに実際にエンドツーエンドの通信を行うホストPCを接続し、映像の伝送などを行いながら使用するリンクの切り替えを実行し、映像伝送にどのような影響が出るか実験するほか、リンクの切り替えがパケットの伝送にどのような影響が出るのか実験・評価を行った。

以降、2章で本システムの構成について説明する。3章では、本システムで構築するプロトタイプシステムについて、4章ではプロトタイプシステムを用いた評価実験についてそれぞれ説明する。最後に、本論文の結語と今後の展望についてまとめる。

2. システム構成

2.1 システムの概要

提案システムは、図2で示されるように複数の選択可能なリンクを有するコネットワークノードによってモバイルアドホックネットワークを構築し、災害対策本部などに設置された管理サーバによって各ノードを管理することで災害情報ネットワークを構成する。各ノードは複数のネットワークインターフェースによって隣接ノードと接続されており、また、各ネットワークノードは管理サーバと通信を行うために、一般的な携帯電話ネットワークなどよりも災害に強い衛星通信などのリンクを持つ。

本システムでは、隣接ノード間のリンクのネットワークステータスを常に監視し、得られた結果によって現時点でもっともコネクティビティが高いと思われるリンクを選択する。また、本システムのネットワークはマルチホップのメッシュネットワークとして構成されるため、通信経路の候補は複数存在する。使用出来る経路の中から、ネットワークステータスを監視することで得られた結果と、ユーザの要求に応じて最適な経路を選択する。例えば、VoIPのような音声通信を行う場合、遅延時間が重要であり、使用可

能な経路の中から遅延時間が小さい経路を選択し、ユーザの要求に応じたQoS制御を実現する。

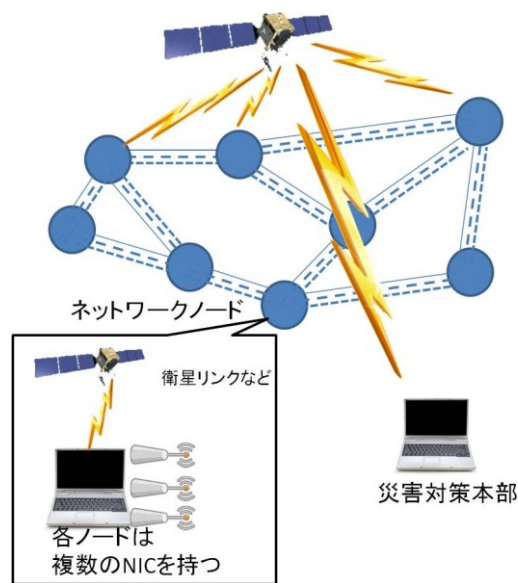


図 2 システム概要

2.2 リンク選択手法

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。

ルート選択に先立ち、リンク選択を行う必要がある。ネットワークノードは、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遅延やスループット、パケットロスレー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を管理サーバへ送信し、それらのパラメータに基づきリンクの優先度を算出することで、実際に使用するリンクを決定する。

ネットワークノードは、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し、管理サーバは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 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. 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。
2. 管理サーバへ測定結果を送信し、AHP を計算
3. ノード間で現在使用されている Link の AHP 優先度が、ほかの Link よりも低下したことを察知。
4. 管理サーバは各ノードへ切り替える指示を発行する。

2.3 経路選択手法

提案手法において、隣接するあるノード間で全てのリンクにおいて接続を確立できない場合は、ネットワークの経路変更を行う。経路変更においても、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

決定した経路を OpenFlowController に送信し、該当するノードの OpenFlowSwitch に Flow テーブル作成の指示を出す。

2.4 Openflow

本研究では、無線をベースとした災害情報ネットワークシステムの構築に、次世代ネットワーク制御技術である「OpenFlow」[2]を新たに導入し、リンクの切り替えを行う。

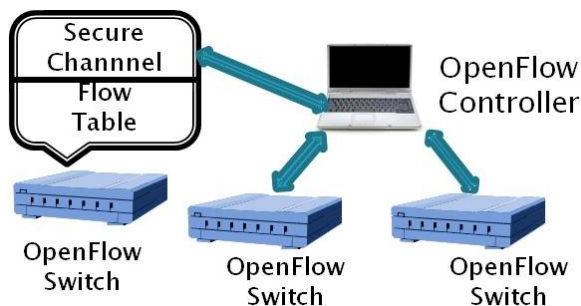


図 3 OpenFlow を用いたリンク切り替え

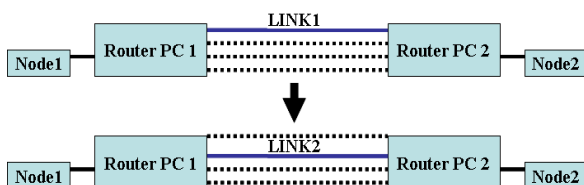


図 4 ノード間のリンク切り替え

OpenFlow は Software Defined Network を実現するために標準化されたアーキテクチャである。ネットワークの経路制御機能とデータ転送機能を分離し、経路制御を行う OpenFlowController と、データ転送機能を行う OpenFlowSwitch によってネットワークが構成される。OpenFlowController と OpenFlowSwitch 間では OpenFlowProtocol による制御情報の通信が行われる。ネットワークをプログラムにより制御することができ、柔軟なネットワーク変更が可能である。ネットワーク制御は中央集散的な OpenFlowController から、各 OpenFlowSwitch の FlowTable を書き換えることで実現される。ネットワークの冗長化や故障の際のフェイルオーバーやフローごとの経路制御が可能であり、あらかじめ複数経路を用意しておき、故障時に自動で別経路を選択する用実装する事が可能である。

図 3・図 4 で示されるように、複数のリンクによって接続されたネットワークノードを OpenFlowSwitch 化し、管理サーバの OpenFlowController から FlowTable を書き換えることによって各ノード間で使用されるリンクを切り替える。

本研究では、OpenFlow を用いて Software Defined Network を構成し、各ネットワークノードに OpenFlowSwitch のフローテーブルを書き換える事によってリンクの切り替えを実現する。

2.5 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 5 に示すとおりであり、Monitoring Layer, OpenFlow Switch, OpenFlow Controller の 3 層から構成される。

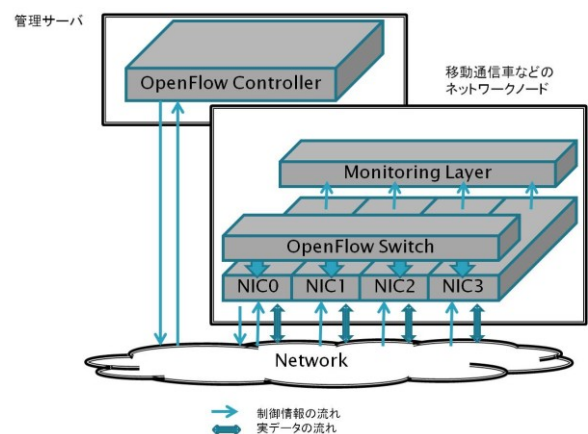


図 5 システムアーキテクチャ

本システムでは Monitoring Layer が測定したネットワークステータスを測定し OpenFlow Switch へ Flow エントリ作成の指示を出すことで、OpenFlow の Switching 機能によって通常の送信パケットを操作する。

Monitoring Layer は内部に各種ネットワークステータス

測定モジュールを内包し、各リンクのスループット、遅延、パケットロスレートなどのパラメータの取得を行う。

OpenFlow Controller は、Trema という OpenFlowController フレームワーク上にネットワーク管理モジュールを実装している。Monitoring Layer から送られたネットワークステータスから各リンクの中で最適なリンクを決定する。また、OpenFlow Switch へ選択されたリンクを使用するよう Flow エントリ作成の指示を出す。

OpenFlow Switch は、OpenFlow Controller から指示されたリンクを使用するよう Flow テーブルの作成を行う。OpenFlow Switch に入ったパケットは、OpenFlow テーブルに従って処理される。

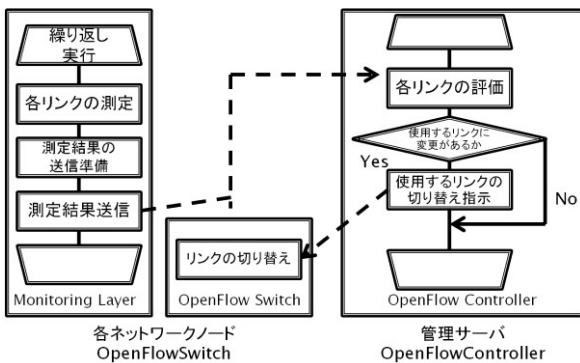


図 6 リンク切り替えアルゴリズム

図 6 はリンク切り替えにおける一連のアルゴリズムを示したものである。各ネットワークノードでは定期的に各リンクの測定が行われ、その結果を管理サーバへ送信する。管理サーバはその情報を元に最適と思われるリンクを決定し、各ネットワークノードの OpenFlowSwitch へ結果を送信する。各ノードの OpenFlowSwitch は FlowTable を書き換え、以降は書き換えられた FlowTable にしたがってパケットを処理する。

3. プロトタイプ構成

本システムにおけるリンク切り替え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、評価を行う。

本研究では図 7・図 8 のように、3 つのリンクによって接続された 2 台のノート PC(ネットワークノード)と、それらの PC とコントロール用のリンクによって接続された 1 台のデスクトップ PC(管理サーバ)によってプロトタイプを構築した。2 台のネットワークノードには OpenFlowSwitch をエミュレーションするための openflow というソフトウェアがインストールされ、Version1.0 までの OpenFlow 機器と同等の機能をもつ OpenFlowSwitch として動作している。管理サーバには、OpenFlowController フ

レームワークである Trema[3] がインストールされ、OpenFlowController として動作させている。

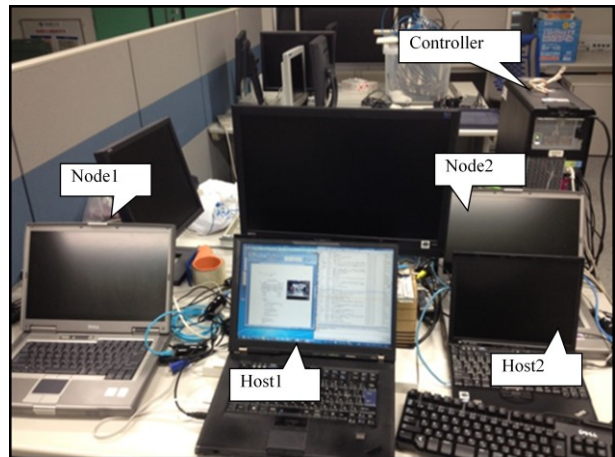


図 7 プロトタイプ構成

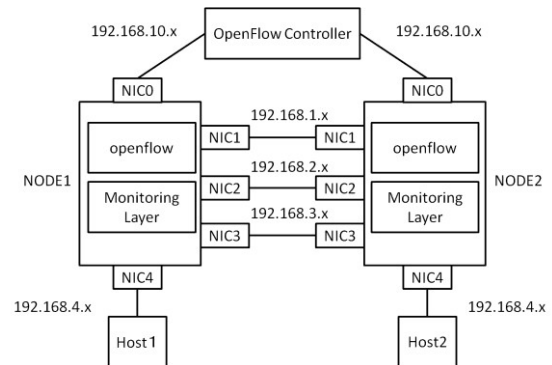


図 8 プロトタイプネットワーク構成

本研究では、ネットワークノードで動作し、各リンクの実効スループットとラウンドトリップタイム、パケットロスレートを測定するためのモジュール、ネットワークノードから管理サーバへの測定結果送信モジュール、管理サーバの Trema 上で動作する、OpenFlowController としての動作を決定するネットワークコントロールモジュールを実装することによって、各ノード間のリンクの切り替え機能テストするためのプロトタイプを構築した。

本プロトタイプシステムは屋内で構築し、リンク切り替えを人為的に発生させるため、全リンク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、パケットロスレートである。

4. 評価実験

4.1 評価実験概要

構築したプロトタイプシステム上で、3 つの評価実験を

行った。

1 つ目のリンク切り替え機能実験では、測定データから算出されたリンクの通り、OpenFlow によるリンクの切り替えが実際に行われているか実験した。

2 つ目の実験では、Iperf によるスループット測定と同時に映像伝送を行い、スループットの測定が映像にどのような影響をおよぼすか実験、調査を行った。

3 つ目の実験では、2 つ目の実験の結果を踏まえ、Pathchirp によるスループット測定と切り替え機能の評価、映像への影響調査を行った。

4.2 リンク切り替え機能実験

OpenFlow で実装したリンク切り替え機能の動作実験を行った。この実験では、システムにおけるパラメータ測定とその送信、その情報を元にした OpenFlow によるリンクの切り替えといったシステムの一連の流れをテストした。

Linux の tc コマンドで各リンクの遅延を 10 秒毎に制御し、想定された通りリンクが切り替わるか、各 Switch に接続された Host 間で Ping を実行し確認する。今回の実験では Ping による RTT を毎秒測定し、その結果をベースとしたリンク切り替えを行った。各リンクの遅延設定値は図 9 の通りである。

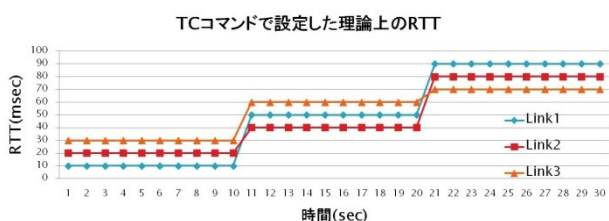


図 9 各リンクの設定パラメータ

今回の実験の設定値では、最初の 10 秒は Link1 が、次の 10 秒間では Link2 が、最後の 10 秒間では Link3 が選択され、エンドツーエンドの Host 間の測定ではそれぞれ 10msec, 40msec, 70msec 程度の値が出るはずである。

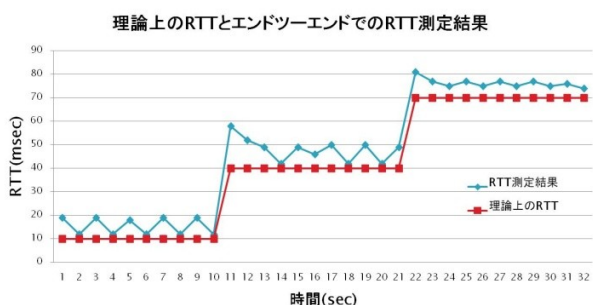


図 10 エンドツーエンドでの RTT 測定結果

図 10 は実験の結果である。切り替え時に 1 秒程度のラグが存在するものの、計測結果によって想定した最適なリンクを選択している。

4.3 Iperf によるスループット測定と映像伝送実験

本実験では、各リンクで iperf を用いてスループットを測定しつつ、エンドツーエンドで映像送受信を行い、映像にどのような影響が出るか実験した。

映像の送受信には MidField System[4]を使用し、ビットレート 2Mbps で UDP による映像の送信を行う。Iperf での測定は各リンクについて 10 秒間ずつ、合計 30 秒間行う。受信側の出力映像をカメラで撮影するほか、MidField System 上で受信ストリームのログを保存し、パケットロスレートについて計測を行った。

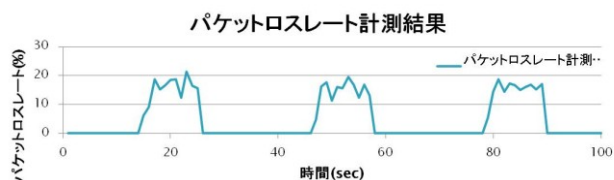


図 11 パケットロスレート測定結果

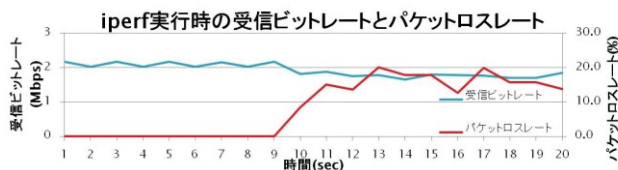


図 12 iperf 実行時の受信ビットレートとパケットロスレート

図 11 と図 12 は、iperf を用いて各リンクのスループットを測定した時の、MidFieldSystem で測定したエンドツーエンドでのパケットロスレートと受信ビットレートである。

図 11 のように、約 10 秒間御パケットロスレートが上昇し、約 20 秒間経過したあとまた 10 秒間程度パケットロスレートが上昇するという結果になったのは、パケットロスレートが上昇している 10 秒間は、iperf によって映像伝送が行われているリンクについて測定が行われており、映像送信のパケットがロスしてしまったものと思われる。

図 12 からは、映像送信に使用されているリンクについて iperf による測定が行われると、受信ビットレートが 10% から 20% 程度低下してしまうことがわかる。

4.4 Pathchirp によるスループット測定ベースの切り替え機能と映像伝送実験

本実験では、tc コマンドで各リンクのパラメータを図 13 のように変化させた上で、PathChirp による測定結果にもとづいてリンクの切り替えを行い、HostPC 間で映像伝送とビデオ撮影を行った。映像の送受信には iperf を用いた前実

験と同様に MidField System を使用し、ビットレート 2Mbps で UDP による映像の送信を行った。PathChirp での測定は各リンクについて 10 秒間ずつ、合計 30 秒間行った。

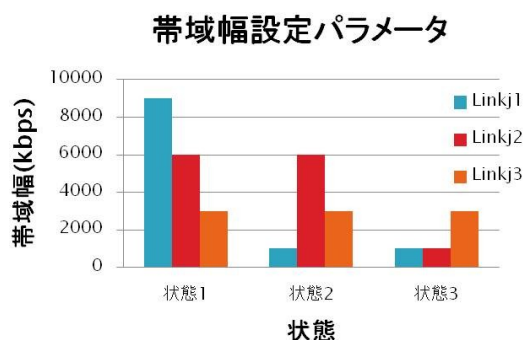


図 13 帯域幅設定パラメータ

今回の実験では災害などにより各リンクの状態が徐々に悪くなっていく状況を想定し、Link1 は広帯域だが、すぐに状態が悪くなる、Link2 は Link1 ほどではないが中程度の帯域幅で、Link1 よりは状態が悪くなりにくい、Link3 では帯域幅は広くないため映像に乱れが出るが、状態が悪くなりやすく映像が止まってしまうほどではないといったリンクを想定してパラメータを設定した。

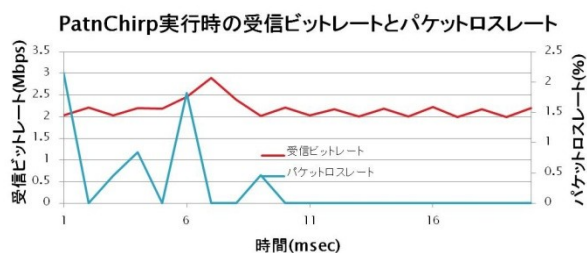


図 14 PatnChirp 実行時の受信ビットレートとパケットロスレート

図 14 から、Iperf による測定と比較して、PathChirp の方が映像伝送に与える影響は少ないことがわかる。本プロトタイプシステム上では各リンクの正確な帯域幅の測定は難しいが、各リンクの設定帯域幅に 3Mbps 程度の差があれば各リンクの帯域幅の順位付けを行うことは可能であり、ラフなリンク選択が可能である。さらに正確な測定に基づく切り替えが必要な場合、PathQuick など別の測定手法を用いるか、測定時のオプションを変更し測定時間を長くするとといったことで、測定時間の短縮や精度が向上する可能性がある。

5. まとめ

本論文では、災害発生直後から通信状況の変化に柔軟に対応するネットワークサービスの構築を提案し、リンク切

り替え機能の実装、各種計測ツールによる各リンクの計測とそれに基づいた OpenFlow によるリンク切り替えについて実験・評価を行った。

現在のプロトタイプでは定期的、かつ常時測定に関するパラメータは同一であるが、これまでの各リンクの測定結果や他のリンクの測定結果から、動的に測定間隔や測定パラメータを変化させ、ネットワークステータスの測定が各リンクに与える影響を少なくするために、状況に応じて測定を行なっていけるよう実装を検討する。またアクティブな測定手法だけではなく、OpenFlow に実装されている各種統計機能を利用し、ネットワークに負荷を与えず測定を行う方法を検討する。

今後 AHP などリンク選択アルゴリズムを検討していくほか、拡張 AODV など、経路選択アルゴリズムを用いたユーザが要求する QoS を満たす通信経路選択機能の実装、OpenFlow の集中管理アーキテクチャによる経路選択アルゴリズムの実装を行なっていく。

参考文献

- 1) Goshi Sato, Yoshitaka Shibata, PC Router Based Dynamic Network Configuration Method for Cognitive Radio LANs, 2010 13th International Conference on Network-Based Information Systems, Takayama, Gifu Japan September 14-September 16
- 2) OpenFlow - Enabling Innovation in Your Network
<http://www.openflow.org/>
- 3) Trema
<http://trema.github.com/trema/>
- 4) "MidField: An Adaptive Middleware System for Multipoint Digital Video Communication", Koji Hashimoto and Yoshitaka Shibata, Digital Video, Edited by: Floriano De Rango, Publisher: INTECH, ISBN 978-953-7619-70-1, pp.263-284, Feb. 2010.
(<http://sciendo.com/books/show/title/digital-video>)