

無線網に対応した実時間映像音声伝送制御の検証のための 時間推移ネットワークエミュレーション

村本 衛一¹ 香林 誠² 石井 秀教³ 明石 邦夫[†] 知念 賢一[‡] 篠田 陽一[†]

¹ パナソニック株式会社 R & D本部 〒571-8501 大阪府門真市大字門真 1006

² 株式会社パナソニックシステムネットワークス開発研究所 〒981-3206 宮城県仙台市泉区明通二丁目 5

³ パナソニック株式会社 AVCネットワークス社 〒812-8531 福岡県福岡市博多区美野島 4丁目 1-62

[†] 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 〒923-1292 石川県能美市旭台 1-1

[‡] 北陸先端科学技術大学院大学 高信頼ネットワークイノベーションセンター 〒923-1292 石川県能美市旭台 1-1

E-mail: {muramoto.eiichi, kohrin.makoto, ishii.hidenori}@jp.panasonic.com,
{k_akashi, k-chinen, shinoda}@jaist.ac.jp

あらまし 無線ネットワークにおける映像音声の実時間ストリーミング伝送制御では低遅延伝送を実現しつつ、変動する帯域に適応してできるだけ高いビットレートで映像音声を送送する伝送制御が必要となる。本稿では、このような伝送制御を検証する際に必要となる時間推移ネットワークエミュレーション方式と伝送制御の開発における機能性能の検証工程における、同方式の利用方法について報告する。無線ネットワークの実網で観測した帯域変動を時間推移的に忠実に繰り返し再現できるため、利用可能帯域を超過して伝送した際に発生する遅延増加（バッファブロー）を防ぎながら、効率の高い伝送を実現する伝送制御を効率的に開発できた。

キーワード 適応流量制御、時間推移エミュレーション、無線エミュレーション

Transitive network emulation method for the verification of adaptive rate control of real-time audio and video streaming via wireless network

Eiichi MURAMOTO¹ Makoto KOHRIN² Hidenori ISHII³ Kazuo AKASHI[†] Kenichi CHINEN[‡]
and Yoichi SHINODA[†]

¹ IR&D Panasonic Corporation, 1006 Kadoma, Kadoma City, Osaka 571-8501, Japan

² Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd., 2-5 Myojin Izumi-ku Sencai-city, Miyagi 981-3206, Japan

³ AVC Networks Company Organization Staff R&D Division, Panasonic Corporation 4-1-62 Minoshima, Hakata-ku, Fukuoka City 812-8531, Japan

[†] School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology, 1-1 Asahidai, Nomi, Ishikawa 923-1292, Japan

[‡] Dependable Network Innovation Center, Japan Advanced Institute of Science and Technology, 1-1 Asahidai, Nomi, Ishikawa 923-1292, Japan

Abstract Adaptive rate control which estimate available bandwidth between sender and receiver is required for the real time audio and video streaming. The feature to trace the best available bandwidth which does not exceed it is very important for TV conferencing especially in wireless environment to prevent the so called bufferbloat problem. In this paper, we report the verification methodology using the time transitive network emulation system that we named as NEM. In the verification, we re-produce the variation of the available bandwidth fluctuation in the wireless network accurately and verified the low-delay and high throughput adaptive rate control using it

Keyword Transitive network emulation, Adaptive rate control, Wireless emulation, Bufferbloat

1. はじめに

TV 会議システム等の実時間音声映像伝送では、インターネットや無線網で発生する可用帯域の変動に追従したレート制御が必要となる。レート制御では、送信端末と受信端末の間の可用帯域を推定し、映像エンコーダのエンコードレートを制御することで、送信端末の送信レートを可用帯域より低く抑えることが必要となる。

本稿では、我々が TV 会議システムに適用したレート制御アルゴリズムの検証に用いた時間推移ネットワークエミュレーションシステム NEM について報告する。ネットワークの挙動をエミュレーションする方式は広く知られているが、時間推移なネットワークエミュレーション方法と、その利用方法を具体的な報告をしたものは、我々の知る限り本稿のほかには例がない。

本稿では、TV 会議システムの製品で利用されているレート制御を改善し、無線対応を行なう際の検証での NEM を利用方法についても具体的に説明する。

1 章の残りで、TV 会議システムの製品で利用いられている伝送制御機能、およびその機能の無線対応における課題を説明する。2 章で検証システムへの要求について説明する。3 章で検証システム NEM の構成とこれを利用した検証方法を具体的に解説し、4 章で関連研究との差分を記述し、5 章で、まとめる。

1.1. 検証済みの伝送制御機能

送信端末と受信端末の間の帯域推定には TFRC[2]のみでは不十分であり、遅延増加を輻輳傾向とみなしてレートを抑止する方式を組み合わせた帯域推定方式を採用した[3]。遅延の増減を用いてレートの増減を決定する具体的な方法としては、統計区間の異なる 3 つの RTT(Round Trip Time)の指数加重移動平均値(短期、中期、長期 RTT)を用いた場合わけを行い、遅延変動の傾向に応じてレートの増減幅を調整可能とした。これは、一般に遅延の増減を観測するレート制御は、広く用いられている Greedy な TCP (Reno, NewReno, BIC, QBIC 等)と競合すると低いレートを算出する[4]が、これに対する対策の導入を可能とするためである。すなわち、TCP と競合状態となった場合、観測している RTT は、伸びることが知られている[1]。これは、Greedy な TCP がボトルネックリングのキューを埋める挙動をするためである。これを前述した統計区間の異なる 3 つの RTT の差で検知して、高めのレートを算出するように調整している。このようなレート制御の調整は、ネットワークエミュレータを用いたテストベッドにおいて繰り返し実験を繰り返す中で実施しており、製品が投入される市場のネットワークに適合すると考えられる状態まで作りこみを行っている。例えば、初期の製品は、日本国内の光アクセス回線 (B フレッツ) での利用を主なターゲットとしていたため、アクセス網での他の TCP との競合を考慮して、上に述べたような調整を実施したり、発生するパケットの順序入れ替えをパケットロスとは算出しないような処理を導入したりしたアルゴリズムを検証してきた。

1.2. 検証対象である無線対応のレート制御

無線網では、輻輳状態に無関係な遅延変動が観測される。図 1 は、3Mbps の映像ストリームを 30 秒間行なった際の伝送遅延 (単位 ms) を図示したものである。パケットロスはまったく発

生していない。遅延の変動は、無線区間の電波状態によって基地局と端末の間で再送が行われたり、伝送速度の変更が行われたりすることに起因して発生すると推測される。しかし、これらの遅延変動は前述したレート制御アルゴリズムでは、ロスが発生しない伝送であるにも関わらず輻輳と判定されてしまうため、同じものを無線網での利用に適用すると不必要にレートを低下させてしまう問題があった。

本稿では、この問題に対策を施したレート制御アルゴリズムを検証の主な対象とする。

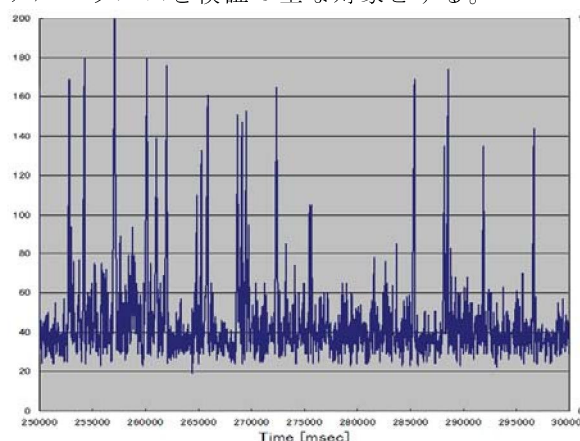


図 1 : WiMAX での伝送時の遅延変動の例

2. 検証システムへの要求

時間推移ネットワークエミュレータを用いた検証に対する要求について述べる。

2.1. 遅延の時間推移の忠実な再現

導入するアルゴリズムは無線特有の遅延変動と輻輳による遅延変動を遅延の変化度合いで区別する。このアルゴリズムを導入したレート制御の挙動を評価するため、検証システムは、実網で発生する遅延変動の時間的推移を忠実に再現する必要がある。

2.2. 帯域変動の再現

無線網では、電波の状態や利用者の増減によって、特定の端末が利用可能な帯域が変動する。完成したアルゴリズムの帯域変動追従性を検証するため、実網で観測される帯域変動の時間的推移を忠実に再現する必要がある。

2.3. キュー長の予測・再現

無線網の基地局や端末の無線リンクのドライバには、帯域の変動やバースト的なパケット到着を吸収するため有限長のキューが導入されている。このキューに蓄積される時間は遅延として、キューからあふれた場合のパケットの消失は、パケットロスとして端末上で観測される。再現すべき無線網の基地局や端末の無線リンクのドライバのキュー長を計測結果から予測し、再現することが必要である。

3. 検証手法

無線網対応のレート制御の開発における検証方針と提案する検証システム NEM およびその利用効果を述べる。

3.1. 検証方式の方針：実網の挙動再現

無線網での挙動を検証する方針としては、モデル化した網の挙動で評価する方針、網の挙動を再現して評価する方針が挙げられる。無線網の挙動は、無線区間の電波の状態や利用者の増減により変化するため、単純にモデル化することが困難である。レート制御が適用される製品が利用される代表的な利用形態（例：WiMAX 基地局からの電波強度が一定以上の場所に設置）での、利用者の経験を保証するため、実網で観測される挙動、すなわち、実網で観測される遅延変動、帯域変動、ロス発生の時間的推移を再現する方法で検証する方針を採用した。

3.2. 検証システム(NEM)

2章で述べた要求を満たす検証システムとして NEM (Network Emulator for Mobile network) を開発した。本節では、NEM の構成要素と時間推移エミュレーション精度について述べる。

3.2.1. 全体構成

NEM は実網の挙動を再現することを目的に以下の2つの機能を実行するツール群で構成される。

- 実網の計測結果のシナリオ生成
- 時間推移エミュレーション

図2に NEM の構成の概念図を示す。

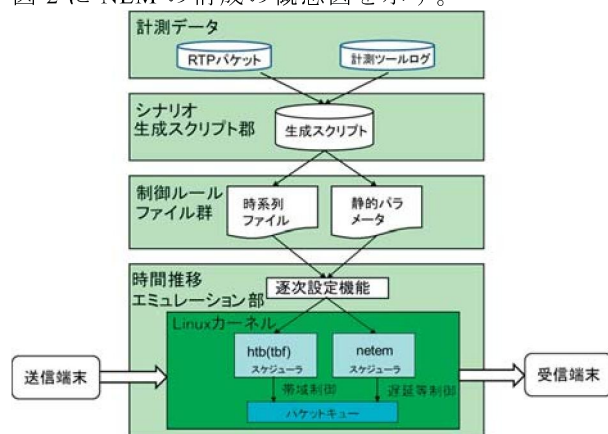


図2：検証システムの構成

3.2.2. 実網の計測とシナリオの生成方法

計測データから時間推移エミュレーションを行なうためのシナリオの生成方法を説明する。図3の構成で、遅延と帯域の時系列の測定を行った。

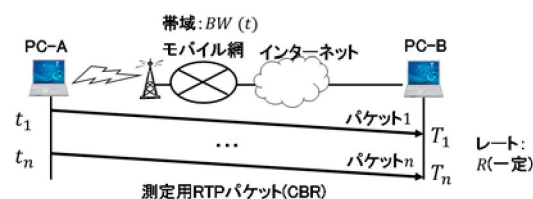


図3：測定系の構成

RTP パケットを固定レートで伝送すれば、次表1のように値を測定・算出して遅延または帯域の時間推移のシナリオを作成することができる。

表1：測定条件と時系列の算出方法

	測定レート	算出方法
遅延	$R < BW(t)$	$D_n = \Delta t_n + d = (T_n - T_1) - (t_n - t_1) + d$ T_n : パケット n の受信時刻 t_n : パケット n の送信時刻 (RTP のタイムスタンプを元に算出) 上記の Δt_n それぞれに対しインターネットの遅延 d (固定値) を加算。
帯域	$R > BW(t)$	$BW(t) = \sum_{t_i \in [t, t+d]} l_i / s$ l_i : パケット i の長さ 受信パケットを等間隔 s で分割し、送信時刻の各区間 $[t, t+s)$ の受信量を帯域と見なす。

なお、逆方向(PC-B→PC-A)の遅延/帯域に関しても同様の考え方でシナリオを作成することができる。

今回は RTP パケットの伝送には市販のネットワーク性能測定ツール IxChariot[9]を使用した。他にも UDP パケットに時刻を格納して固定レートで送信する測定ツール(例：D-ITG[10])であれば同様のシナリオ作成を行うことが可能である。

3.2.3. 時間推移エミュレーション

NEM の帯域制御は、Linux カーネルの htb(hierarchical token bucket)の機能を用いて、遅延制御は、netem[5]の機能を用いて実現する。また、これらの時間推移エミュレーションは、QOMET[6]の時系列ファイルの逐次設定実行モジュール do_wireconf を用いて実現した。QOMET では、FreeBSD の DummyNet[16]を用いて IP 層でパケットの挙動をエミュレートしているが、L2 の無線リンクでのパケットの挙動を

再現するため、上述のように Linux で `do_wireconf` を動作させる構成を採用した。

本稿で着目する時間推移エミュレーションは帯域制御と遅延制御のみであるが、`do_wireconf` では、この他にパケットロス率を指定することが出来る。

3.2.4. 時間推移エミュレーションの精度

NEM の遅延変動の再現状況を評価するため、SmartBits と PC（仕様：表 2）を用いた 1 対 1 通信の環境を構築した（図 4 参照）。

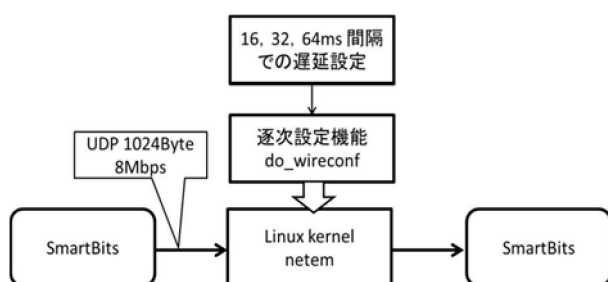


図 4：再現性の評価環境

表 2：PC の仕様

CPU	Xeon E5620@2.40GHz 4Core x2
メモリ	24GBBytes
NIC	Intel 1000ET Dual Port Server Adapter
OS	Ubuntu 10.04 Server (Hz=100)

SmartBits は、Packet 長 1024Byte の UDP データグラムを 8Mbps で送信する。実網の計測により得た遅延変動のデータから 16、32、64ms 間隔で遅延の設定を行う 3 パターンのシナリオを作成し、これらを用いて再現性の評価を行った。図 5-7 がフィールドで計測した遅延変動のデータとエミュレーションの結果を、Y 軸を遅延時間[ミリ秒]、X 軸を実験時間[秒]でプロットしたものである。

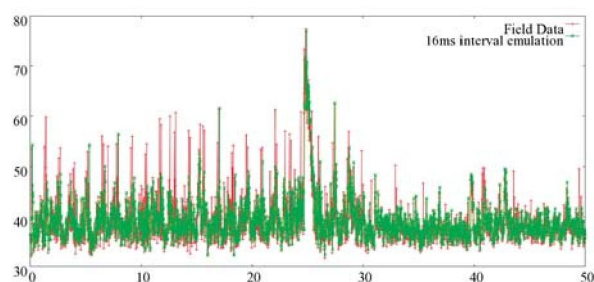


図 5:遅延設定間隔 16ms の実験結果

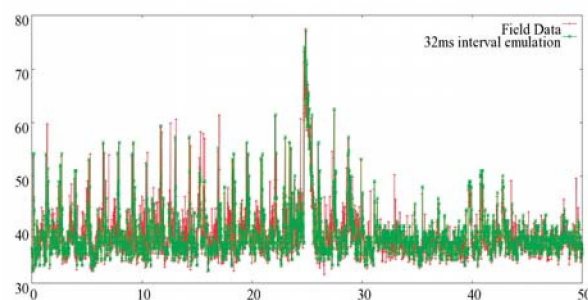


図 6:遅延設定間隔 32ms の実験結果

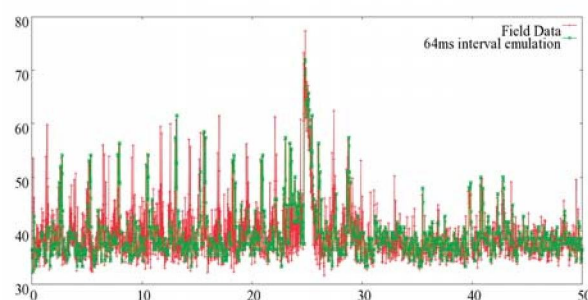


図 7:遅延設定間隔 64ms の実験結果

これらのグラフから非常に短い時間で発生しているスパイクには追従出来ていないが、25 秒目付近で発生している大きな遅延変動に追従した模倣ができていていること、および遅延設定間隔を短くすれば、スパイク状の遅延変動を再現する頻度が多くなることが分かる。

なお、上記の評価では評価環境の制約から、遅延変更間隔は 16ms が最小であったが、8ms や 4ms といったより短い時間で遅延変動させたい場合は、タイマ実装の精度を上げることで、遅延変動の再現度を高めることができる。上記の評価では、使用した PC でタイマの割り込みに Programmable Interval Timer(PIT) を使用していた。Linux カーネルの HZ=100 で PIT を用いている場合、タイマの割り込み周期は 10ms が論理限界となる。

本 PC で Linux カーネルに対して netem 設定を反映するのにかかる時間は 90us 程度であり、その他の処理を含めた 1 回の設定にかかる時間は 150us 程度である。従って、今回使用した PC の最小時間粒度は約 10.2ms となる。

High Precision Event Time(HPET) は PIT よりも高精度なタイマである。HPET を用いることでタイマの割り込み周期は 65us 程度であった。つまり、計算上では、約 220us の時間間隔での動作が期待できる。

使用したハードウェアはそれぞれ異なるが、以下の図 8、9 に Fedora6(PIT 使用、HZ=250)、Ubuntu10.04(HPET 使用、HZ=100)のノードで sleep からの復帰時間を 10000 回計測した結果の CDF フラグを示す。Y 軸が累積確率密度で X 軸が sleep からの復帰時間[us] である。

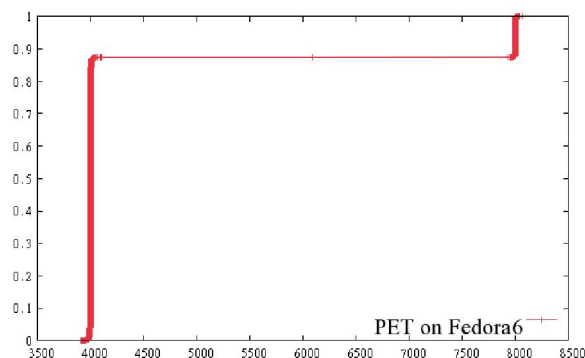


図 8:PIT 使用時の sleep 復帰時間

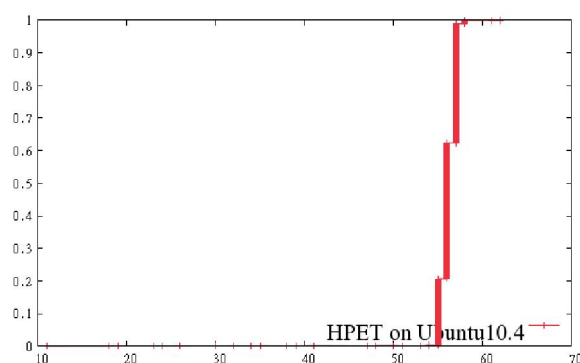


図 9:HPET 使用時の sleep 復帰時間

これらの検証結果より、遅延変動の時間推移の再現性を高めたい場合、求める再現度に応じたタイマ精度を有したカーネル上で時間推移エミュレーションを実施する必要があることが分かる。

なお、本節では、遅延制御の設定に着目して設定粒度の性能限界について述べてきたが帯域制御のための設定値を逐次設定する粒度についても同様の限界が存在する。

つまり、実験の時間推移的な遅延設定間隔や帯域制限設定間隔の要求に応じて、エミュレーションに用いる実験機器の主に CPU 性能、OS が提供するタイマ精度の限界を考慮して検証環境を作る必要がある。

3.3. 検証システムの適用

NEM を用いた検証の具体例について述べる。

3.3.1. 伝送制御方式開発における利用

1 章で説明したレート制御の検証における NEM の利用工程について説明する。既存のレート制御アルゴリズムに対して、無線網特有の遅延変動を輻輳による遅延変動を区別するアルゴリズムを導入する。このときの検証工程は以下の 3 工程となる。

1. 導入したアルゴリズムの機能評価
2. 既存のアルゴリズムの機能劣化がないことを確認する degradation 評価 (デグレ評価)
3. 実利用を想定したシステム評価

工程 1 では、無線網特有の遅延変動を導入したアルゴリズムが検知できるかどうか検証する工程では、無線網特有の典型的な遅延変動のパターンを発生させ、導入したアルゴリズムがこれにより不必要にレートを低下させないか検証する。

工程 2 では、既存のレート制御に求められる性能要件を満たしているかを検証する。つまり、レート制御の機能改善を行なう場合、既に製品としてリリース済みの性能を劣化させてはならない。既存機能の性能劣化がないことを検証するため、改定を加えた機能の既存の性能要件を再度検証する。性能要件とは、例えば、1 章に述べたパケットの順序入れ替えにより不必要にレートを落とさない特性や、特定のパケットロス率以内では、極端にレートを落とさない特性や、輻輳と判定される遅延増加でレートを落とす特性や、TCP と競合した際にできるだけ公平に帯域を分け合う特性などである。この工程は、既存のレート制御の検証に用いてきたテストベッドやエミュレータを用いて実施する。

工程 3 では、実際の無線網での利用で利用者が経験する映像の乱れ劣化や音の途切れなどが目標の範囲に収まっているかを検証する (主観評価)。例えば、WiMAX の基地局からの電波強度が -60dBm 程度の場所に設置した場合に観測される伝送条件 (帯域や遅延の変動) において、TV 会議システムとして会話が成立するかどうかという視点での主観評価 (MOS mean opinion score 値で評価) を行なう。

これらの検証工程において、工程 1 および 3 で NEM を利用することができる。すなわち、工程 1 では、無線網特有の遅延変動を NEM で繰り返し再現させ、輻輳と誤検知せず、本来の輻輳を正しく輻輳と検知する方式を調整して導

き出す。例えば、図 2,3,4 の 0 秒-20 秒に発生しているスパイク状の遅延変動では輻輳と判定せずレートを維持し、25 秒目付近の遅延変動で輻輳と判定しレートを落とすようにレート制御を調整する。工程 3 では、改良したレート制御を組み込んだ TV 会議システムの双方向のストリームに対して、実網で観測された遅延変動や帯域変動を NEM で再現させ、TV 会議として実用に耐えるかという視点で映像の劣化度や無音区間や音とびの発生度を MOS 値で評価する。

3.3.2. 遅延変動の再現

計測データから時間推移エミュレーションを行なうためのシナリオ生成方法については 3.2.2.節で説明した。生成したシナリオは、NEM の入力形式（テキスト）に従ったファイルとして保存する。実験時に、このシナリオファイルを入力として、NEM を実行することで、遅延変動を再現することができる（図 10）。

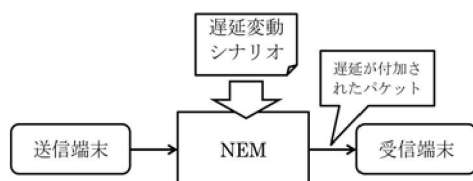


図 10: 遅延変動の再現

3.3.2.1. 遅延変動を再現した検証の効果

無線の遅延変動を繰り返し再現できることで、無線の遅延変動に対応したレート制御アルゴリズムを改善する作業が可能となる。ここでは、NEM により遅延変動を再現させながら改善したレート制御の例を示す。

図 11、12 は、LTE 通信した際に発生する遅延変動を NEM により再現させた状態で、それぞれ、無線対応のアルゴリズム（急峻な遅延変動を輻輳とみなさない）を導入しないもの（旧レート制御）、導入したもの（新レート制御）の送信ビットレートを示したものである。新レート制御では輻輳ではない遅延変動により、不必要にレートを落とすことがなく、高スループットで通信できていることが分かる。

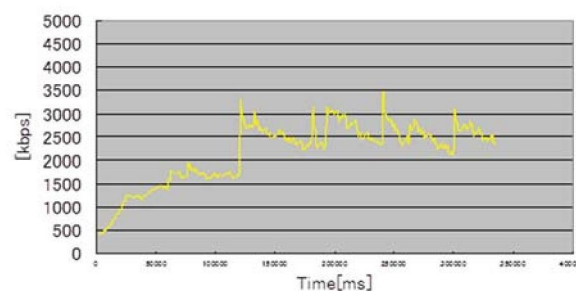


図 11: 旧レート制御（遅延変動区別なし）

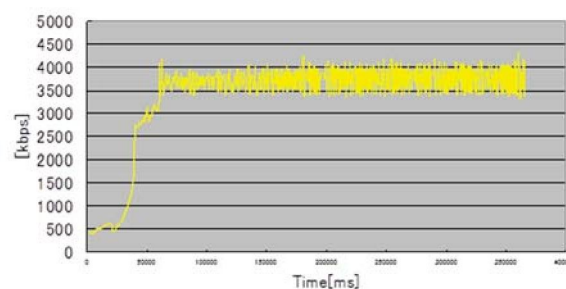


図 12: 新レート制御（遅延変動区別あり）

3.3.3. 帯域変動の再現

● 帯域変動の再現の必要性

インターネット等のベストエフォートネットワークでは、複数の通信でボトルネックとなる回線帯域を共有するため、端末の利用状況に応じて、端末 1 台が利用できる可用帯域が変動する。

さらに無線網では、無線の帯域を共有する端末の数や端末にとっての電波の状態によっても可用帯域は時間推移的に変動する。

実時間映像音声ストリームの伝送制御を行なうレート制御アルゴリズムとしては、変動する帯域に追従し、できるだけ高スループットを得ることが望ましい。

しかし、可用帯域を越えたストリームデータを送信すると、ボトルネックリンクでパケット落ちを経験する。もしくは、ボトルネックリンク通過時に大きなキューイング遅延を経験するため、再生時刻を越えて受信端末に届いてしまい結果的に受信端末のデコーダで破棄されるといった事象が発生する。

レート制御アルゴリズムの評価の工程では、端末が利用される無線網での利用可能帯域の時間推移的な変動を再現し、その追従性を検証すること必要がある。

帯域変動の再現は、実網で発生する帯域変動を計測し、時間推移的なシナリオを作成する。

● 帯域計測結果のシナリオ化

実網で発生する帯域変動を計測する方法としては、過去の通信における変動を記録する方法、可用帯域として想定しうる最大レートで送信し、受信帯域を記録する方法がある。

レート制御アルゴリズムの評価においては、前者は、3.3.1 節で説明したデグレ評価で用いる。後者は、無線網がボトルネックとなっている場合の可用帯域の変動を再現させる機能評価で利用する。

いずれの場合でも、キャプチャしたパケットから、単位時間あたりの受信ビットレートを算出し、時間推移的なシナリオデータを生成する。

● キュー長の予測

ボトルネックリンクのキュー長は、流入したパケットの伝送遅延の最大値やパケット落ちが発生するタイミングに大きな影響を与える。

実時間映像音声ストリームの伝送制御を行なうレート制御アルゴリズムは、遅延の変動やパケット落ちの発生具合で輻輳の有無を判断する。このため、ボトルネックリンクのキュー長を正確に推定し、推定したキュー長を設定したエミュレータで帯域の変動を再現することが必要である。

キュー長推定では、次の条件を仮定している。

- 1) ボトルネックリンクは、伝送経路中で変動しない
- 2) ボトルネックリンクのキュー長は一定
- 3) ボトルネックリンク以外で伝送遅延は変動しない

まず、伝送経路中の最低伝送遅延時間 d を計測する。次に、ボトルネックリンクの可用帯域を超えるレートでパケットを送信し、単位時間あたりの受信レート $BW(t)$ を可用帯域、伝送できたパケットの遅延時間 $D(t)$ とすると、 $D(t)$ から $\bar{d}$ を引いた値が、パケットがキューを通過する際に要した時間となる。このとき、キューの帯域遅延積 L は以下の式で求められる。

$$L = BW(t) \times (D(t) - \bar{d})$$

この関係を用いて、キュー長を逆算する。

実際の無線網での計測では、受信レートとキューの通過時間を 1 秒毎に測定し両者を各秒でそのまま乗算しても、 L は一定とならなかった。このため、受信レートと遅延の 1 秒毎の時系列を -10~10 個ずらしたときの帯域遅延積のばらつき(標準偏差)を求め、これが最も小さい場合

の上り・下りの帯域遅延積の時系列における平均値をキュー長の値として採用している。

3.3.3.1. 帯域変動を再現した検証の効果

帯域変動を再現し、レート制御アルゴリズムを検証・調整することで、実網で発生する可用帯域の変動に忠実に適応する伝送方式を開発することが可能となる。

図 13、14 は、それぞれ、他社 TV 会議システムとパナソニック製の TV 会議システムの帯域変動への追従性を評価したものである。図中で赤線は、パナソニックの都内事業場 (B フレッツ利用) で TV 会議システムを運用している際に経験した帯域の変動をシナリオ化したものである。緑の線は、それぞれの TV 会議システムの送信帯域を示したものである。図 13 の他社 TV 会議システムでは、通信開始後しばらくすると、可用帯域への適応動作をほとんど行わないような動作をしていることが分かる。可用帯域を越えて送信するとパケットロスが発生する。また、特に Wi-Fi などの無線環境で可用帯域を越えてパケットを伝送すると、無線 LAN 基地局や無線 LAN ドライバにパケットが長時間滞留し遅延が増加する Bufferbloat[12]と呼ばれる問題が発生する。TV 会議システムなどの低遅延伝送を必要とする実時間ストリーミングを行なう場合、Bufferbloat を起こさないレート制御を行なうことが重要となる。図 14 では、可用帯域を超過しない範囲でレート制御を行なっているため、パケットロスは発生しておらず、極端な遅延増加がない伝送を実現している。

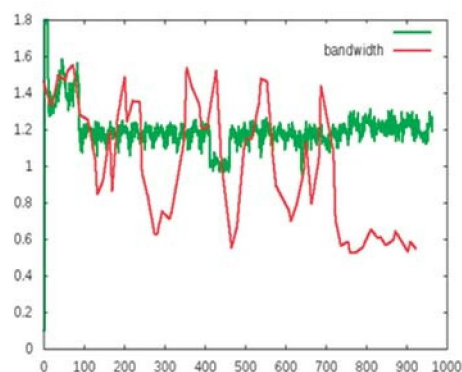


図 13：他社 TV 会議システムの帯域追従性

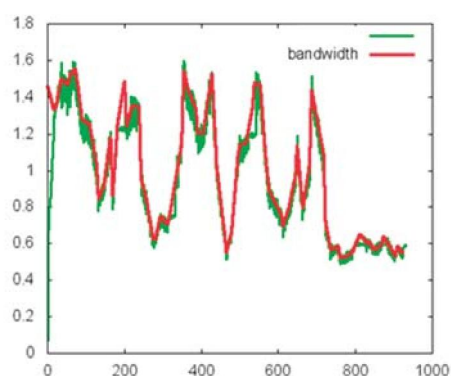


図 14：パナソニック TV 会議システムの帯域追従性

4. 関連研究

時間推移ネットワークエミュレーションに関する関連研究と本稿との差分について述べる。

QOMET[6]は、StarBED[11]を用いて無線リンクのロス・遅延・帯域の時間推移的な変動を再現するエミュレータである。無線の伝播特性と移動端末やロボットなどのエミュレーション対象の移動モデルを入力として、時間推移的な変動シナリオを生成し、StarBED 上の PC で無線リンクの時間推移的挙動を再現する。本稿では、QOMET の時間推移エミュレーションする駆動部を利用し、実網で計測したデータを下に再現する方式を採用している。また、L2 の挙動として再現するため、Linux への移植を行なっている[17]。

PacketStorm 社の製品[8]は、単位時間毎にパケットロス率や遅延を動的に変更する機能を有するものがある。モバイル網等で観測したデータから本製品を駆動するシナリオを生成する機能は含まれておらず利用者が作成する必要があるが、具体的な方法は示されていない。本稿では、無線網で映像音声の実時間ストリーミング伝送制御の検証に必要なシナリオの生成方法および検証の適用方法を示している。

低遅延で高スループットを実現する Sprout[7]の検証において、無線網の帯域変動をエミュレーションする方式として cellsim が紹介されている。本稿で示した方式と同様の目的で開発されたものと推測できるが、時間推移の精度に関する記述や、帯域変動におけるキュー長の採用方針等、実網のエミュレーションに必要な考察は十分述べられていない。

IETF において、RTP や WebRTC での伝送における輻輳制御方式の標準化を行う RMCAT-WG[13]が作業を行なっている。評価方式のインターネット草案[14]が作業部会の草案として寄稿されている。この中で、輻輳崩壊を防止する仕組みの必要性や競合するトラフィックとの公平性の確保の重要性が述べられている。しかしながら、テストシナリオに関する草案[15]は、個人名の草案として寄稿されており、

議論中の状態である。本稿のエミュレーション方式でも、議論中の帯域変動のシナリオを実行可能である。

5. まとめ

無線網を通じて映像音声の実時間ストリームを低遅延、高品質に伝送するには、可用帯域を越えない範囲で出来るだけ高ビットレートで伝送するレート制御が重要となる。遅延増加を輻輳傾向とみなすレート制御アルゴリズムの無線網対応においては、無線の再送等により発生する突発的な遅延増加と輻輳傾向を示す遅延増加を区別する機能を導入する。この検証においては、実網で発生する遅延変動や帯域変動といった時間推移的なネットワークの挙動を繰り返し再現できるエミュレータが必要となる。本稿で紹介した NEM では、実網の挙動をシナリオ化し、再現環境である PC の時刻再現精度で再現できる。本稿では、実網計測に基づく遅延変動シナリオ、帯域変動シナリオの作成方法を示した。この中で、ロスや遅延の発生タイミングに影響するため、レート制御アルゴリズムの検証で重要となるボトルネックリンクのキュー長の算出の方法を具体的に提示した。また、遅延変動検証、帯域変動検証によってレート制御アルゴリズムの性能向上に果たす効果、すなわち、低遅延かつ高スループットが要求される TV 会議システム等の実時間音声映像伝送において、可用帯域を越えず、かつ、帯域変動への追従性に優れたレート制御を作りこむことができることを例示した。今後は、遅延や帯域変動の様子を可視化するツールの拡充をしていき、開発検証工程における、NEM の利用性の向上を行なっていきたい。

謝辞

NICT 北陸 StarBED 技術センター（旧 北陸リサーチセンター）には、QOMET 利用に当たりアドバイスをいただいた。パナソニックシステムネットワークス株式会社セキュリティシステム事業部のエンジニア各位には、無線対応の TV 会議システムの商品化において、本稿のエミュレータを活用し、製品の検証にご尽力いただいた。感謝申し上げたい。

参考文献

- [1] K. Nichols and V. Jacobson, Controlling queue delay, ACM Queue, 10(5), May 2012
- [2] S.Floyd, et al., "TCP Friendly Rate Control (TFRC): Protocol Specification", RFC5348, September 2008.
- [3] 村本衛一、米田孝弘、小西一暢、蓑田佑紀、知念賢一：エンコード、デコード制御によるインターネット経由の映像音声ストリームの高信頼、低遅延伝送制御の実現、インターネットコンファレンス 2010 (IC2010)
- [4] G. Hasegawa, K. Kurata, and M. Murata, "Analysis and Improvement of Fairness between TCP Reno and Vegas for Deployment

- of TCP Vegas to the Internet,” in Proceedings IEEE ICNP 2000, November 2000
- [5] S Hemminger, Network emulation with netem. Linux Conf, April 2005.
- [6] Razvan Beuran, Lan Tien Nguyen, Toshiyuki Miyachi, Junya Nakata, Ken-ichi Chinen, Yasuo Tan, Yoichi Shinoda: QOMB: A Wireless Network Emulation Testbed. GLOBECOM 2009: 1-6
- [7] Keith Winstein, Anirudh Sivaraman and Hari Balakrishnan, Stochastic Forecasts Achieve High Throughput and Low Delay over Cellular Networks, in the proceedings of the 10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2013), Lombard, Ill., April 2013
- [8] PacketStorm homepage, [http://www.packetstorm.com/psc/psc.nsf/0/CB469E090E5400498525768D004DDC55/\\$file/IPNetworkEmulator_Data_Sheet.pdf](http://www.packetstorm.com/psc/psc.nsf/0/CB469E090E5400498525768D004DDC55/$file/IPNetworkEmulator_Data_Sheet.pdf)
- [9] IxChariot homepage, <http://www.ixiacom.com/products/ixchariot/>
- [10] A. Botta, A. Dainotti, A. Pescapè, "A tool for the generation of realistic network workload for emerging networking scenarios", Computer Networks (Elsevier), 2012, Volume 56, Issue 15, pp 3531-3547
- [11] Toshiyuki Miyachi, Ken-ichi Chinen and Yoichi Shinoda, StarBED and SpringOS large-scale general purpose network testbed and supporting software, International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (Valuetools) 2006, ACM Press, ISBN 1-59593-504-5, Pisa, Italy, Oct.2006
- [12] J. Gettys and K. Nichols, Bufferbloat: Dark buffers in the internet Queue, 9(11):40:40–40:54, Nov.2011
- [13] rmcats-wg charter home page, <https://datatracker.ietf.org/wg/rmcats/charter/>
- [14] V. Singh, J. Ott, Evaluating Congestion Control for Interactive Real-time Media, internet draft, draft-ietf-rmcats-eval-criteria-01.txt, 2014
- [15] Z.Sarker, V. Singh, X. Zhu, M. Ramalho, Evaluation Test Cases for Interactive Real-Time Media over Cellular Networks, internet draft, draft-sarker-rmcats-cellular-eval-test-cases-01.txt
- [16] L.Rizzo, Dummynet: a simple approach to the evaluation of network protocols, ACM SIGCOMM Computer Communication Review 27 (1), 31-41, 1997
- [17] 明石 邦夫、井上 朋哉、安田 真悟、村本 衛一、知念 賢一、宇多 仁、篠田 陽一: 「リンクエミュレータの多重実行の限界値測定」, インターネットコンファレンス 2009 (IC2009)