

## 無線 LAN ハンドオーバーに伴う接続不能期間に注目した TFRC 性能評価

大塚 裕太<sup>†</sup> 田村 大輔<sup>†</sup> 石原 進<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 静岡大学大学院工学研究科 〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1

<sup>††</sup> 静岡大学創造科学技術大学院 〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1

E-mail: †{otsuka,tamura,ishihara}@ishilab.net

あらまし RTP や TFRC といったリアルタイム通信を行うためのトランスポートプロトコルは通信環境観測によるフィードバック制御によって送信レート制御を行っている。そのため無線 LAN 環境においてハンドオーバーが発生した場合、ハンドオーバー前もしくはハンドオーバー中に発生したパケットロスといった観測情報がハンドオーバー後も保持され、正確なレート制御ができない可能性がある。本稿ではシミュレーションによって、TFRC を採用した DCCP CCID3 によるビデオストリーム通信を行う移動端末が混雑した環境にハンドオーバーを行った場合のハンドオーバー実行中に発生する接続不能期間がハンドオーバー後の通信品質に与える影響を評価しその対策を検討する。

キーワード 無線 LAN, TFRC, ハンドオーバー, QoS 制御

## Performance evaluation of TFRC focused on disconnection period due to wireless LAN handover

Yuta OTSUKA<sup>†</sup>, Daisuke TAMURA<sup>†</sup>, and SuSumu ISHIHARA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineerings, Shizuoka University Zyohoku 3-5-1, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561 Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University Zyohoku 3-5-1, Naka-ku Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561 Japan

E-mail: †{otsuka,tamura,ishihara}@ishilab.net

**Abstract** Transport protocols such as RTP and TFRC take control of sending rate by feedback-controls which measure RTT, packet loss rate, etc. On wireless LANs, the communication condition changes drastically when a node hands over from an uncongested access point to a congested one. However, the node keeps measured values after handover. Because of this, the node may not be able to control the sending rate accurately. In this paper, we present the result of simulations of DCCP CCID3 video streams adopting TFRC focused on disconnection period due to heavy loaded wireless LAN handover. We also discuss some schemes to avoid the effect of handovers.

**Key words** Wireless LANs, TFRC, Handover, QoS Control

### 1. はじめに

近年通信速度の高速化に伴い、Web サイト閲覧や電子メールの送受信といった従来のベストエフォート型通信だけでなく、IP 電話やビデオ会議、オンラインゲームといったリアルタイム通信を必要とするアプリケーションが広く普及してきている。このような通信を実現するためには、低遅延や帯域に見合ったレート制御と実現が必要となっている。

これらの要求に応えるために開発されたトランスポートプロトコルの 1 つとして DCCP [5] と呼ばれる TCP 親和性や輻輳制御等を考慮したトランスポートプロトコルが近年注目を集め

ている。DCCP では CCID による伝送方法の選択が可能であり、中でも TCP Friendly Rate Control (TFRC) を採用した CCID3 はリアルタイムビデオストリーミングに適するトランスポートプロトコルであると考えられている。

この DCCP CCID3 を無線環境下において利用した場合、複数端末によるチャネルの競合や高レートで通信を行う移動端末のハンドオーバー、雑音等の無線通信妨害によるパケット損失の上昇によって端末一台あたりの利用可能帯域幅が有線通信時よりも変動する可能性が大きい。とりわけ利用可能帯域幅の急激な減少が発生した場合、アプリケーションレベルの影響としてフレームロスによる動画や音声の停止などが予想される。ま

た TFRC ではパケットを受信する端末が受信したパケットを元に通信環境を観測し、その情報を送信端末にフィードバックする事でレート制御を行うため、ハンドオーバーの発生に伴うアクセスポイント (AP) との接続不能期間やハンドオーバー先 AP の環境変化によって、それまでに観測した通信環境が現在の通信環境との間に相違が生じてしまい正確な環境観測が行えない可能性がある。

本研究ではこれら問題点を明確にするため、IEEE802.11 DCF によるメディアアクセス制御が行われ利用可能帯域が常に変動するような無線 LAN 環境において、ハンドオーバー実行中に発生する接続不能期間がトランスポート層に与える影響に注目し、高負荷無線 LAN 環境下へのハンドオーバー時における DCCP CCID3 のシミュレーションによる性能評価を行った。

## 2. ハンドオーバー発生が TFRC 通信を行う端末に与える影響

DCCP CCID3 [6] で採用されている TFRC では、受信端末が受信データを基に通信環境の観測を行い、その情報を送信端末へ通知する事によってレート制御を行う。このようなフィードバック制御によるレート制御を行う端末がハンドオーバーを実行した場合、端末がハンドオーバー前の送信レートを維持したままハンドオーバー後の AP で通信を継続する事になる。この時、ハンドオーバー後の AP がハンドオーバー前の AP よりも混雑した環境にある場合、MAC 層でのパケット衝突が頻発しハンドオーバーを行った端末 (移動端末) はパケットの送信が円滑に行えずビデオや音声が停止してしまう可能性がある。同様に移動端末がハンドオーバーを行う以前からその AP で通信を行っていた端末 (先住端末) も MAC 層でのパケット衝突によって通信速度低下といった影響を受ける可能性がある。

また TFRC ではフィードバック情報は一定期間の観測情報を基にフィードバック情報を作成するため、ハンドオーバー後も一定期間はハンドオーバー前の観測情報を保持したまま通信を行う事となる。一般的に、ハンドオーバー前の通信環境とハンドオーバー後の通信環境ではその関連性は低い事から、ハンドオーバー前の観測情報を保持したままハンドオーバーを行う場合、ハンドオーバー前の観測情報がハンドオーバー後のレート算出に利用されるため、ハンドオーバー後のレート制御が正確に通信できないといった悪影響を与える [4]。

加えてハンドオーバーを行うためにはハンドオーバー前の AP との接続を解消し、ハンドオーバー後の AP との接続を確立する必要があるため、ハンドオーバー実行中に AP との通信が行えなくなる時間 (接続不能期間) が発生する可能性がある。AP との接続不能期間におけるパケットロスもハンドオーバー後の通信環境との関連性は無いため、ハンドオーバー後のレート制御に影響を与えられ考える。

## 3. TCP Friendly Rate Control

TCP Friendly Rate Control (TFRC) [2] は受信者のフィードバック情報を元にして、送信者が送信レートを算出式に基づいて UDP 伝送量を決定するレート制御プロトコルである。算

出式に基づき決定される TFRC 通信の送信レートは、同一ネットワーク下に存在する TCP 通信の送信レートと同程度となるように計算される。また、TFRC では一定期間の観測情報を基にフィードバック情報が決定されるため、緩やかなレート制御を行うという特徴がある。このため、ビデオストリーミングといった滑らかな品質変化が好まれるリアルタイムアプリケーションに対して TFRC は有効であると考えられる。TFRC の制御の概要は以下の通りである。

### 3.1 レート制御方法

送信者はタイムスタンプ、シーケンス番号、RTT 見積もり情報をパケットに付加して送信を行う。受信者は自身で観測したロスイベント率や送信者から送られてきた RTT 見積もりによって送信レート見積もり値を算出する。そしてタイムスタンプ  $t_{recvdata}$ 、フィードバック送信遅延  $t_{delay}$  (受信者がデータを受け取ってからフィードバックを送信するまでの経過時刻)、帯域幅見積もり  $X_{recv}$  (受信側による利用可能帯域幅の見積もり)、ロスイベント率  $p$  の 4 つの情報を含んだフィードバック情報を送信する。送信者はこれらフィードバック情報を元に利用可能帯域幅計算を行い、最終的に送信レートを算出する。同一ネットワークに存在する TCP フローが  $b$  パケット受信する (通常は  $b = 1$ ) 毎に ACK を返信するものとする、TFRC による利用可能帯域幅  $X_{calc}$  の計算は以下の式によって行われる。

$$X_{calc} = \frac{s}{R\sqrt{\frac{2bp}{3}} + t_{RTO} \left( 3\sqrt{\frac{2bp}{3}} p(1+32p^2) \right)} \quad (1)$$

$s$  はパケットサイズ (bytes)、 $R$  は Round Trip Time (パケット到達所要時間)、 $p$  はロスイベント率、 $t_{RTO}$  は再送タイムアウト時間を意味する。また、送信レート  $X$  は次のように決定される。

$$X = \max \left( \min(X_{calc}, 2X_{recv}), \frac{s}{t_{mbi}} \right) \quad (2)$$

$t_{mbi} = 64$  (sec) であり、送信端末は少なくとも 64 秒毎にパケットを送信する事となる。

TFRC ではこのようにフィードバック情報を基にしたレート制御を行う。しかし通信環境が著しく悪くフィードバック情報が  $T$  秒間到達しない場合には深刻な輻輳が発生していると判断し送信レートを半分にする。  $T$  は以下のように決定される。

$$T = \max \left( 4R, \frac{2s}{X} \right) \quad (3)$$

### 3.2 フィードバック情報の送信

受信端末は一定期間ごとにフィードバック情報を含んだパケットを送信端末に送信する。フィードバックパケットには、タイムスタンプ  $t_{recv}$ 、送信遅延  $t_{delay}$ 、見積もり送信レート  $X_{calc}$ 、ロスイベント率  $p$  が含まれている。  $t_{recv}$  には受信端末が送信端末から受信した中で最も大きいシーケンス番号  $i$  を持つ (最新の) パケットに記されているタイムスタンプ情報  $ts_i$  が格納される。すなわち  $t_{recv} = ts_i$  となる。また、最新のパケットを受信してからフィードバックパケットが送信されるまでの時間を  $t_{delay}$  とする。

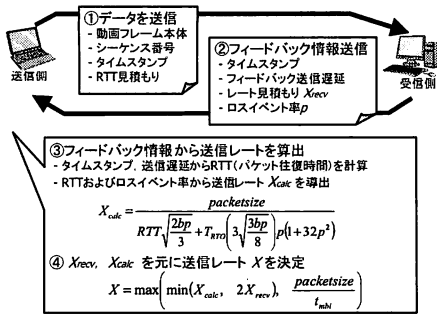


図1 TCP Friendly Rate Control によるレート制御

Fig.1 TCP Friendly Rate Control

### 3.3 RTT の算出

RTTの算出するためにまず、最新のRTTサンプル  $R_{sample}$  を求める。 $R_{sample}$  は送信端末がフィードバック情報を受信した時刻(現在時刻)  $t_{now}$  およびフィードバック情報に含まれるタイムスタンプ  $t_{recvdata}$ 、フィードバック送信遅延  $t_{delay}$  から算出する。

$$R_{sample} = (t_{now} - t_{recvdata}) - t_{delay} \quad (4)$$

算出された  $R_{sample}$  が始めて算出されたものであった場合、すなわちフィードバック情報はそれ以前に届いた事がない場合には  $R = R_{sample}$  とする。また、そうでない場合には以下の式によって決定される。

$$R = qR + (1 - q) R_{sample} \quad (5)$$

この時  $q$  は定数であるが、推奨される値は  $q = 0.9$  である。

### 3.4 ロスイベント率の算出

ロスイベント率  $p$  の算出は次の手順で行われる。

- (1) ロスイベントを検出する。
- (2) ロスイベントの発生間隔からロスインターバルを計算する。

(3) 算出された8つのロスインターバルから、最新のロスインターバルが大きく反映されるように重み付けを行い平均ロスインターバル  $I_{mean}$  を算出する。

- (4) ロスイベント率  $p = \frac{1}{I_{mean}}$  を算出。

## 4. シミュレーション評価および検討

複数端末が接続され、混雑した状態にある IEEE802.11 無線 LAN における AP に新たな端末がハンドオーバーを行った際、全端末の TFRC フローへの影響をシミュレーションにより評価した。

### 4.1 ネットワーク構成

シミュレータとして OPNET を使用した。DCCP プロトコルには OPNET Contributed Models の一つである TU Braunschweig DCCP Model [7] を一般的な無線 LAN 上の IP ネットワークに対応できるよう改変して用いた。図2にシミュレーションで用いたネットワーク構成を示す。各無線端末はインタフェースとして IEEE 802.11b を備え、シミュレーション開始

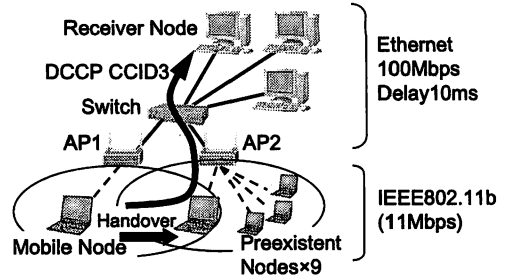


図2 ネットワーク構成

Fig.2 Network topology

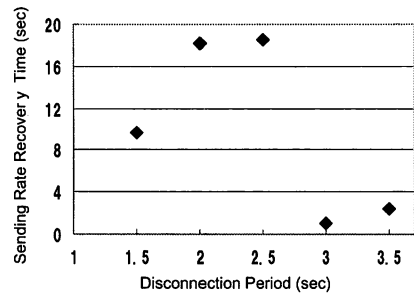


図4 レート回復所要時間

Fig.4 Sending rate recovery time

から5秒経過した時点でアクセスポイント(AP)を通じて固定ネットワークに存在する端末に向けて DCCP CCID3 による通信を行う。

シミュレーション開始後20秒後経過した時点で AP1 との通信を解消し、一定期間経過後 AP2 との通信を確立する事でハンドオーバーを行う。この期間を接続不能期間とする。ハンドオーバー先である AP2 には9台の先住端末(移動端末がハンドオーバーを行う以前からハンドオーバー先で通信状態にある端末)が通信を行っている。各端末はアプリケーション層のデータソースとして 629bytes のパケットを 0.01 秒毎に生成する(503.2kbps に相当)。生成されたパケットはトランスポート層にバッファリングされ、DCCP CCID3 によってその送信量が調節される。各端末の MAC 層の送信バッファサイズは 50 パケット分である。シミュレーションは各条件で 10 回ずつ行い、各評価値の平均値を得た。

### 4.2 接続不能期間が送信レートに与える影響

図3にハンドオーバーに伴う接続不能期間が異なる場合における移動端末および先住端末の平均送信レートを示す。先住端末の値は10台の平均値である。接続不能期間はそれぞれ1.5秒、2.5秒、3.0秒、3.5秒である。接続不能期間が1.5秒、2.5秒と比較的短い場合、ハンドオーバー完了後移動端末送信レートが先住端末送信レートよりも低い値となる状態が10秒以上続く事が確認できた。一方接続不能期間が3.0秒、3.5秒と比較的長い場合、移動端末はハンドオーバー完了後すぐに自身の送信レートを回復させ、2、3秒程度で先住端末平均送信レートと同等な

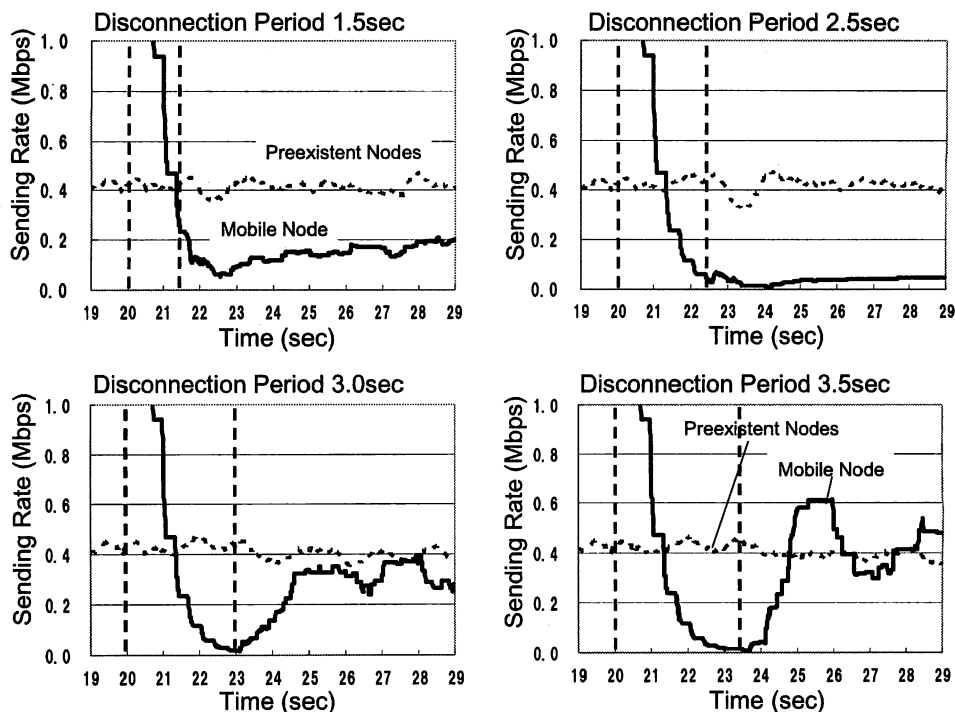


図 3 平均送信レート  
Fig. 3 Average sending rate

値となっている事がわかる。この事から、ハンドオーバに伴う接続不能期間が移動端末の送信レート決定に影響を与えていると考えられる。

これを検証するために移動端末のハンドオーバ完了後、移動端末の接続不能期間と移動端末レート回復所要時間の相関関係を評価した。これを図 4 に示す。移動端末および先住端末 10 台の送信レートの標準偏差が 85kbps を下回る状態を定常状態と定め、定常状態移行までにかかる時間をレート回復所要時間とした。この定常状態は次のようにして定義した。まず本研究で想定したものと同一のネットワーク構成および端末を用い、ハンドオーバを行わない無線端末 10 台が固定ネットワークに存在する端末に向けて DCCP CCID3 による通信を行った場合の送信レート推移をシミュレーションによって求めた。得られた端末 10 台の送信レートの標準偏差は 81kbps を上回る事が無かった事から、端末 10 台の送信レート標準偏差が 85kbps を下回る場合には各端末のレート制御は安定した状態にあると考え、これを定常状態と定めた。

図 4 から、接続不能期間が 3 秒未満においてはレート回復所要時間が長く、接続不能期間が 3 秒以上においてはレート回復所要時間が短いといえる。この事から接続不能期間がハンドオーバ後移動端末のレート上昇、すなわち送信レート算出に影響を与えていると考えられる。TFRC では端末の送信レート算出に平均ロスインターバルから算出されるパケットロス率、そして RTT を用いる。この事から、接続不能期間が移動端末の TFRC フローにおける平均ロスインターバルおよび RTT の正

確な観測を妨げていると推測できる。

#### 4.3 接続不能期間が平均ロスインターバル算出に与える影響

図 5 に接続不能期間とハンドオーバ後の移動端末における平均ロスインターバルの推移を表す。同図ではハンドオーバ完了時の時刻を 0 秒としている。接続不能期間が短い場合、平均ロスインターバルはハンドオーバ完了後、移動端末よりも低い値にまで低下している事が分かる。一方、接続不能期間が長い場合には、平均ロスインターバルはハンドオーバ完了後、移動端末よりも高い値となっている。また、平均ロスインターバルは接続不能期間が 4.5 秒以上ではほぼ一定の 4000 程度となっている事が分かる。平均ロスインターバルはロスイベントの検出された 2 つのシーケンス番号の差から算出されるため、約 4000 パケットに 1 度ロスが検出されているとみなす事ができる。

ロスインターバルはロスイベントが検出される間隔を表すもので、その値が小さければ小さいほどロスが頻発している事を表す。この事から接続不能期間中は連続したパケットロスが発生するため、接続不能期間の増加によって連続パケットロスが長くなる。しかし DCCP CCID3 では、連続するパケットロスは一つのロスイベントとみなされるため、接続不能期間中のロスイベントは 1 として計算される。その結果ロスインターバル値が不当に高くなるという現象が発生する。これにより、ハンドオーバ期間が長い場合にはハンドオーバ完了後移動端末送信レートが急激に上昇するものと考えられる。

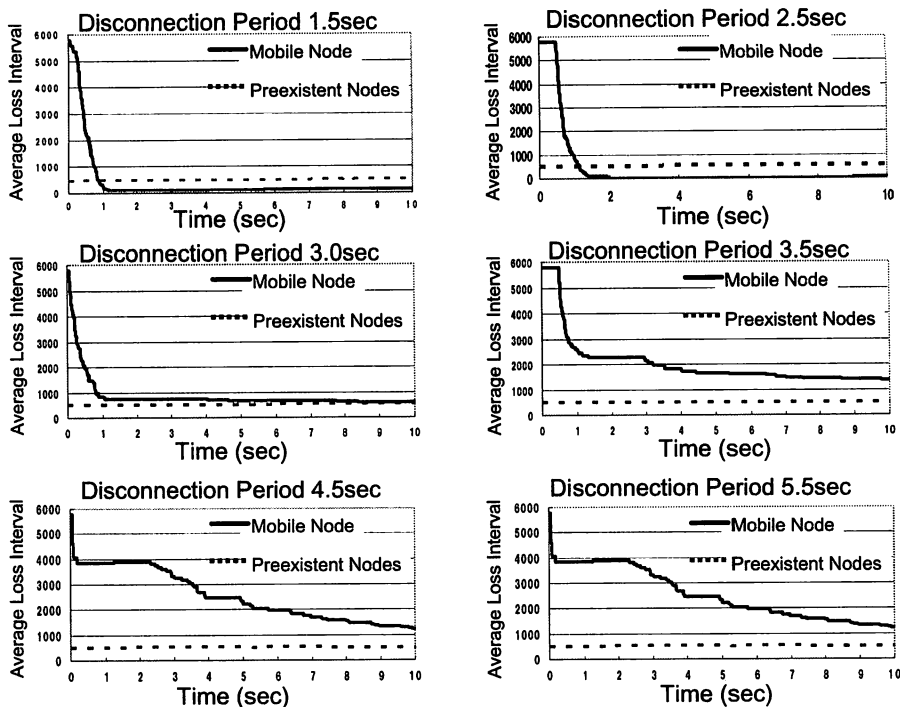


図5 接続不能期間と移動端末平均ロスインターバルの関係  
Fig. 5 Average loss interval of mobile node vs disconnection period

#### 4.4 接続不能期間が RTT に与える影響

図6に接続不能期間とハンドオーバー後の移動端末におけるRTTの推移を表す。同図ではハンドオーバー完了時の時刻を0秒としている。接続不能期間が3.5秒以下において移動端末のRTTは先住端末のRTTよりも高い値を示している。一方で、接続不能期間が4.5秒以上においては、移動端末のRTTは先住端末のものと同程度、もしくは低い値となっている。一般的に、接続不能期間中に生成されたパケットはハンドオーバー完了後接続が確立されるまでは端末のMAC層における送信キューに溜められる事になる。このことからRTTの増加は接続不能期間に伴いパケットの送信バッファに留まる時間が増加したためだと考えられる。RTTが高い場合には、TFRCレート算出式より、送信レートは低く算出される。

#### 4.5 検 討

以上のシミュレーションによってハンドオーバーに伴う接続不能期間が平均ロスインターバルおよびRTTの適切な算出を阻害する事が確認できた。また接続不能期間がRTTや平均ロスインターバルといった観測値に与える影響を評価した結果、次の傾向がみられた。

- 接続不能期間中パケットは送信バッファ内に留まるためRTT値が増大する。
- 連続パケットロスの一つのロスイベントとみなされるため、ハンドオーバー後の平均ロスインターバル算出値が接続不能期間によって大きく変化する。

RTTや平均ロスインターバルといったフィードバック情報

算出の特徴として、最新のRTTおよびロスインターバルだけを利用するのではなく、緩やかなレート制御を実現するために過去に算出されたRTTおよびロスインターバルを考慮した算出を行う事が挙げられる。一般にハンドオーバー前とハンドオーバー後の通信環境は両者にほとんど関係性はないが、この特徴からDCCP CCID3といった環境観測に基づくフィードバック制御によって動作する送信レート制御を行う端末がハンドオーバーを行った場合、ハンドオーバー後のフィードバック情報にハンドオーバー前の観測情報が含まれてしまい送信レート算出が正確に行えない可能性がある。このような理由からDCCP CCID3のように、環境観測に基づくフィードバック制御によって送信レート制御を行う端末がハンドオーバーを行う場合には、以下のような方法が有効であると考えられる。ただし、以下の方法はいずれもトランスポート層がハンドオーバー発生を検出できる事が前提となる。

- ハンドオーバー先APで利用可能な帯域幅を端末側で事前に算出し、ハンドオーバー前にあらかじめ送信レート変更を行う[1][3]。
- ハンドオーバー発生を受信端末に通知し、受信端末側はハンドオーバー前やハンドオーバー中の観測情報をフィードバック情報に含めない。

前述の通り、ハンドオーバー中もしくは前後の通信環境は互いに関係性が低いため、この手法によってハンドオーバー後の通信環境のみを観測する事でより正確な送信レート算出が可能であると考えられる。

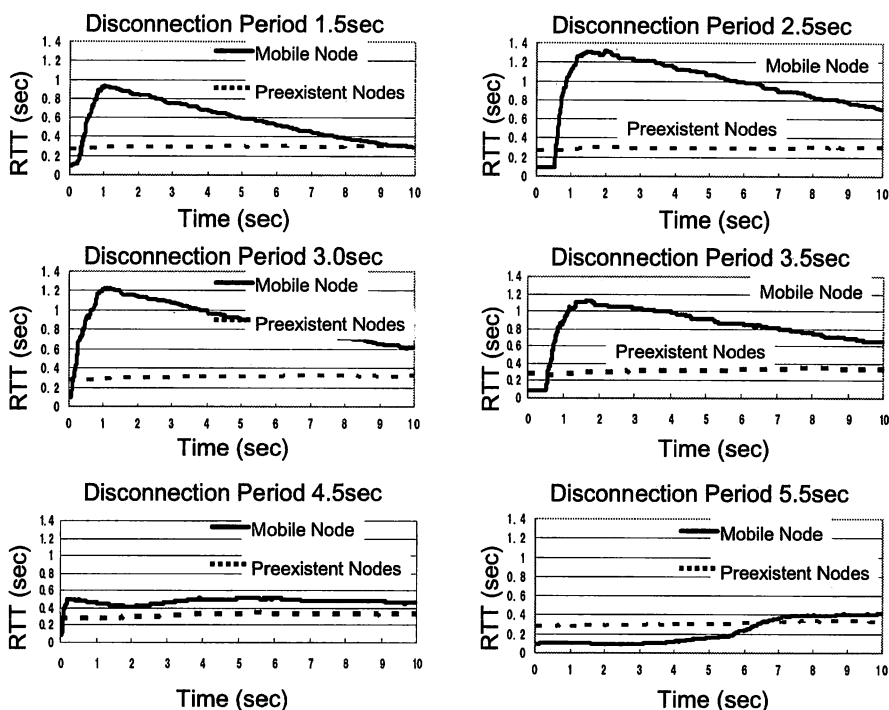


図 6 接続不能期間と移動端末 RTT の関係  
Fig. 6 Round trip time on mobile node of mobile node vs disconnection period

C. ハンドオーバー完了後一定期間、測定した最新の観測情報に対して敏感な状態にする。

最新の RTT およびロスインターバルがより大きく反映されるように重み付けする事で、ハンドオーバー後の通信環境に対して、より迅速に対応できると考えられる。

D. 接続不能期間中は送信バッファ内のパケットを一定量破棄する。

これは接続不能期間中に溜められた送信バッファ内のパケットを意図的に破棄する事で RTT 増大を防ぐ事を目的としている。一般的にリアルタイムビデオストリーミングを行う場合、生成されてから一定時間を越えたパケットはリアルタイム性の観点から再生する事ができない。この事から接続不能期間中に生成されたパケットは再生される可能性が低く、破棄の有無に関わらず再生品質に差が起きにくいと考えられる。

## 5. おわりに

無線 LAN 上で移動端末が先住端末の存在する混雑した AP へハンドオーバーを行う場合を想定したシミュレーションによって、DCCP CCID3 によるレート制御を行う移動端末の通信品質に与える影響を評価した。本稿では特にハンドオーバーに伴う AP との接続不能期間に注目した評価を行った。これにより、ハンドオーバー時の接続不能期間での連続したパケットロスが移動端末の TFRC フローにおける RTT やロスイベント率といった観測情報に影響を与えハンドオーバー後の送信レート制御が適切に行われない現象を確認する事ができた。今後の課題として

ハンドオーバーが観測情報に与える影響についてより分析しハンドオーバー時における適切な環境観測方法の検討を行うとともに、現実的なビデオストリーミングを想定したシミュレーション評価を行う事が挙げられる。

## 文 献

- [1] S. Ishihara, K. Koyama, G. Miyamoto, M. Kuroda, "Predictive rate control for realtime video streaming with network triggered handover", in proc. of WCNC2005, NET-06-03, 2005.
- [2] S. Floyd, J. Padhye, J. Widmer, TCP Friendly Rate Control (TFRC): Protocol Specification, RFC 3448, <http://www.faqs.org/rfcs/rfc3448.html>, 2003.
- [3] D. Tamura, G. Miyamoto, M. Kuroda and S. Ishihara, "Predictive rate control for video stream on handover on wireless LAN," in proc. of the 9th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2006), pp.615-619, 2006.
- [4] A. Gurtov, J. Korhonen, "Effect of Vertical Handovers on Performance of TCP-Friendly Rate Control", ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, pp.73-87, 2004.
- [5] E. Kohler, M. Handley, S. Floyd, Datagram Congestion Control Protocol (DCCP), RFC 4340, <http://www.faqs.org/rfcs/rfc4340.html>, 2006.
- [6] S. Floyd, E. Kohler, J. Padhye, Profile for Datagram Congestion Control Protocol (DCCP) Congestion Control ID 3: TCP-Friendly Rate Control (TFRC), RFC 4342, <http://www.faqs.org/rfcs/rfc4342.html>, 2006.
- [7] X. Gu, P. Di, L. Wolf, "Performance Evaluation of DCCP: A Focus on Smoothness and TCP-friendliness", Annals of Telecommunications Journal, Special Issue on Transport Protocols for Next Generation Networks, pp.191-216, 2006.