社団法人 情報処理学会 研究報告
IPSJ SIG Technical Report

2009－DPS－138 (54)
2009－CSEC－44 (54)
2009／3／6

プローブパケットを用いた無線LAN接続下における DCCP送信レート推定方法の検討

大塚裕太[†1] 石原 進[†2]

無線LANによる通信を行う端末は，APに接続する端末の台数，通信レート等によって一台あたりの利用可能帯域幅が大きく変動する．そのためハンドオーバによる急激な利用可能帯域の低下が起きる場合に，リアルタイムデータの送信に伴うレート制御が追いつかず，データの到着遅れが発生するといった問題がある．このような問題を解決する一手法として，移動先APの環境を事前に把握し，ハンドオーバ前に把握した送信レート予測値によって送信レートを変更させる手法が有効である事が確認されている．この送信レートを推定するための方法として，我々は混雑環境時の無線LANのフレーム受信間隔の揺らぎに注目している．本稿ではトランスポート層にDCCP CCID3を用いることを前提に，DCCPによって通信を行う無線端末（DCCP端末）が存在する環境下において，DCCP送信レートとプローブパケットの受信間隔との関連性をシミュレーションおよび実測により評価する．また，一定間隔で無線通信を行う端末から送信されるプローブパケットの受信間隔から送信レートを推定するための方法を提案し，現実環境において100 msec間隔で生成されるプローブパケットの受信間隔を100秒間測定する事でDCCP送信レートを推定できる事を確認した．

A Study for estimation of DCCP sending rate using probe packets

YUTA OTSUKA[†1] and SUSUMU ISHIHARA[†2]

On wireless LANs, the available bandwidth of a node changes according to the number of nodes connected to the access point, data rate and so on. Therefore, when a node hands over from an idle wireless access point to a congested one, due to the delay of the adaptation of data sending rate, packets of realtime data may suffer excessive transmission delay. To prevent this problem, we have proposed a scheme that a control server notifies a handover node of a suitable new sending rate according to estimated available bandwidth at the new AP. To estimate the available bandwidth, we focus that the transmission interval of MAC frames varies on congested WLANs. In this paper, we evaluate the corelation between the interval of arrival time of probe packets which are sent periodically on a wireless LAN and the sending rate of data flows of DCCP CCID3 on a real wireless LAN. Based on the measurement and the simulation results, we propose a scheme to estimate a sending rate using inter-arrival time of probe packets. Measurement results in a real wireless LAN revealed that the scheme can estimate DCCP sending rate by the measurement of inter-arrival time of probe packets sent every 100msec for 100 sec.

1. はじめに

本稿では，無線インターフェースを用いてIPネットワークへ接続する端末が，リアルタイムマルチメディア通信を行う環境を想定している．このような環境では，通信環境の異なる無線アクセスポイント（AP）間で相互にハンドオーバを行った場合に，ハンドオーバを行った端末の利用可能帯域幅が大きく変動し，その結果再生品質に大きな影響を受ける可能性がある．

筆者らはこれまでに，IEEE802.11bによって通信を行う端末がハンドオーバを行った場合において，パケットロスの発生やTCP Friendly Rate Control (TFRC)[1)] の正確な送信レート算出が阻害される現象を確認している[2)]．具体的には，利用可能帯域幅の広いAPから利用可能帯域幅の狭いAPへハンドオーバを行った場合に，ハンドオーバ後もしばらくの間利用可能帯域幅よりも高い送信レートでパケットの送信を行ってしまうために，パケットロスが引き起こされる問題がある．また，利用可能帯域幅の狭いAPから利用可能帯域幅の広いAPへハンドオーバを行った場合にも，ハンドオーバ前の環境で測定されたフィー

†1 静岡大学工学研究科システム工学専攻
Graduate School of Engineering, Shizuoka University
†2 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

ドバック情報が用いられる事でハンドオーバ後に算出される送信レートが利用可能帯域幅よりも高くなってしまう問題もある．これら問題は，IEEE802.11 AP間のハンドオーバ（水平ハンドオーバ）だけでなく，GPRS ネットワークから無線 LAN といったように，異種無線間ハンドオーバ（垂直ハンドオーバ）でも確認されている[3]．

筆者らは水平ハンドオーバが発生する環境下で端末がハンドオーバ後の送信レートを適切に決定するための方法として，予測情報を用いたレート予測手法 (予測レート制御)[4] を提案してきた．この予測レート制御手法では，端末のハンドオーバをネットワーク側が事前に察知し，ハンドオーバ後にその端末が利用可能な帯域幅の推測値，あるいはそのヒントとなる情報をその端末に通知する．この情報を元に，移動端末はハンドオーバー前にあらかじめレートの変更を行う．これにより混雑環境へ高い送信レートのままハンドオーバする事によって発生するパケットロスや遅延の増大を抑制する事が可能である事をシミュレーション評価によって確認している[5]．

予測レート制御手法ではハンドオーバ先 AP の利用可能帯域幅の予測精度によってその効果が大きく左右される．筆者らこれまでに，無線 LAN AP 下に存在するプローブパケットジェネレータが一定間隔で生成するパケットの受信間隔の揺らぎ（ジッタ）と DCCP CCID3[6] 送信レートの関連性に注目し，ジッタから送信レートを推定する方法を提案した[5]．シミュレーション評価により，無線端末が 0.2 秒間隔で 54 bytes の UDP パケットを送信し，受信側がパケット受信間隔の揺らぎを測定する事で DCCP 送信レートを予測する事が可能である事が示された．しかしながら，現実環境では送信レートと測定されるジッタとの関連性が弱まるため，ジッタによる高精度なレート推定が行えない事が測定実験により確認されている[7]．

本稿では，無線 LAN AP 下において DCCP CCID3 によって通信を行う端末（DCCP 端末）の台数の増減した場合の，端末一台あたりの DCCP 受信レート（スループット）とプローブパケットジェネレータの MAC 層の振る舞いをシミュレータおよび実測評価によって分析する事で，プローブパケットジェネレータの生成するパケットの受信間隔と受信レートとの間に関連性がある事を示す．またこの関連性を基に，無線 LAN AP 下に存在するプローブパケットジェネレータによって一定間隔で生成されるプローブパケットの受信間隔を用いた送信レート推定方法を提案する．

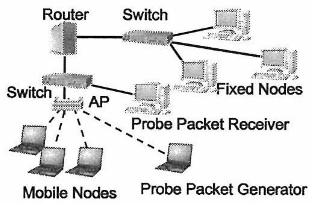


図 1　ネットワーク構成

2. 理想環境における DCCP 受信レートとプローブパケットジェネレータ MAC 層の関係性

本章では電波干渉の発生しない理想的な環境において，DCCP 端末が増減した場合の端末一台あたりの DCCP 受信レートとプローブパケットジェネレータの MAC 層の挙動をシミュレーションによって分析し，その関連性について議論する．

2.1 シミュレーション条件

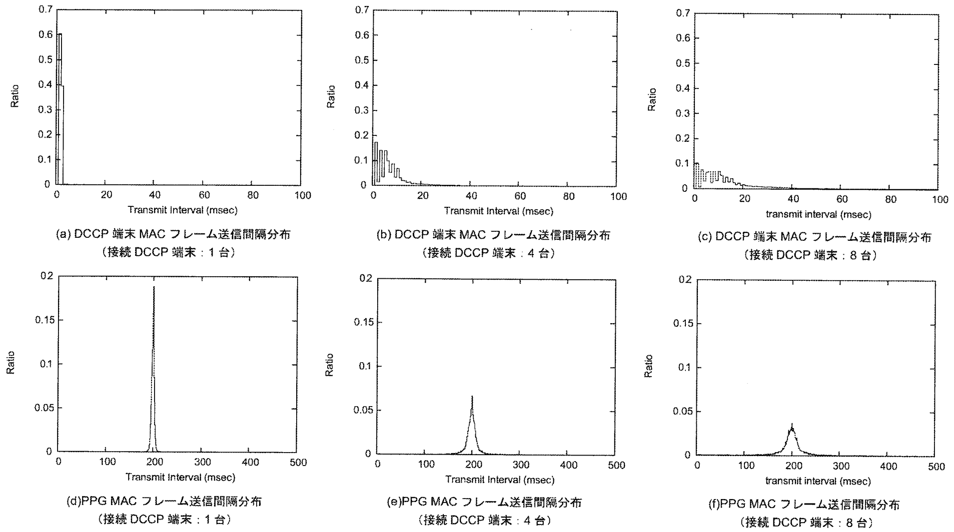
図 1 にシミュレーションで用いたネットワーク構成を示す．各無線端末は IEEE802.11b を用いて AP に接続するものとし，通信速度は 11 Mbps の固定レートを用いる．有線リンクの通信速度は 1 Gbps，遅延を 1 msec とした．

シミュレーション開始から 5 秒後，各無線端末は DCCP CCID3 を用いて 1400 bytes のパケットを有線側に接続された端末に向かって送信する．プローブパケットジェネレータは 0.2 秒間隔でペイロード長 56 bytes の UDP パケットを生成し，プローブパケット受信端末に対して送信される．これは 3.36 kbps のトラフィックに相当する．シミュレーション時間は 1800 秒間とし，シミュレーション時刻 200〜1700 秒の 1500 秒間の測定値を用いて評価を行った．

ネットワークシミュレータとして OPNET を用いた．無線 LAN による通信は他の AP からの電波干渉といった影響は受けない理想的な環境で行われているものとする．DCCP プロトコルには OPNET Contributed Models の一つである TU Braunschweig DCCP Model[8] 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．

2.2 シミュレーション結果

図 2 の (a)〜(c) に，接続する DCCP 端末台数が 1, 4, 8 台の環境下における DCCP 端末の MAC フレーム送信成功間隔の分布を，また同図 (d)〜(f) に，同様の環境下におけるプローブパケットジェネレータプローブパケットジェネレータの MAC フレーム送信成



(a) DCCP 端末 MAC フレーム送信間隔分布（接続 DCCP 端末：1 台）
(b) DCCP 端末 MAC フレーム送信間隔分布（接続 DCCP 端末：4 台）
(c) DCCP 端末 MAC フレーム送信間隔分布（接続 DCCP 端末：8 台）
(d)PPG MAC フレーム送信間隔分布（接続 DCCP 端末：1 台）
(e)PPG MAC フレーム送信間隔分布（接続 DCCP 端末：4 台）
(f)PPG MAC フレーム送信間隔分布（接続 DCCP 端末：8 台）

図 2 理想環境における DCCP 端末およびプローブパケットジェネレータ (PPG) の MAC フレーム送信成功間隔分布（接続 DCCP 端末 1, 4, 8 台）

DCCP 端末台数	プローブパケットジェネレータの MAC フレーム送信成功間隔分布範囲	DCCP 端末 平均受信レート
1	200 ± 8 (msec)	5,745 (kbps)
2	±17	3,026
3	±31	2,054
4	±52	1,569
5	±71	1,269
6	±90	1,055
7	±143	916
8	±139	803
9	±175	718
10	±183	651

表 1 プローブパケットジェネレータの MAC フレーム送信成功間隔分布範囲と DCCP 端末平均受信レートの関係

功間隔の分布を示す．

DCCP 端末の MAC フレーム送信成功間隔の分布に注目すると，DCCP 端末台数が 1 台の場合には MAC フレーム送信成功間隔は 0 msec 付近に集中している．一方，端末台数が増加するに従って，送信成功間隔の分布範囲が広がり，MAC フレーム送信成功間隔の平均値が大きくなる事が確認できる．これは，単位時間当たりのフレーム送信機会の現象を意味している事から，IEEE802.11b における通信速度が一定である場合には，端末一台あたりの利用可能帯域幅の減少を招く．

また，プローブパケットジェネレータの MAC フレーム送信成功間隔についてみてみると，競合する DCCP 端末台数が少ない場合には 200 msec 付近に送信成功間隔が分布しているが，競合する端末台数が増加すると送信成功間隔の分布範囲が広がる事が確認できる．

表 1 に，DCCP 接続台数が 1 から 10 台接続する環境における，プローブパケットジェネレータの MAC フレーム送信成功間隔の分布範囲と DCCP 平均受信レートを示す．表中の分布範囲は，プローブパケット生成間隔である 200 msec を中心として，得られたサンプルの 98% が存在する範囲を表している．DCCP 端末の台数が増加するに伴い，MAC フレーム送信成功間隔分布範囲が広範囲に広がり，また端末 1 台あたりの DCCP 受信レートが減少するという関連性が確認できる．

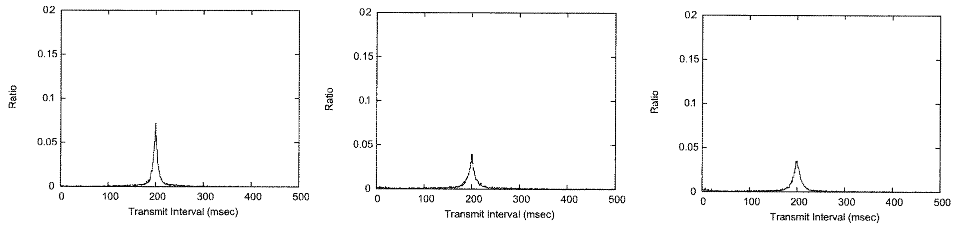
3. 現実環境における受信レートとプローブパケットジェネレータ MAC 層の関係性

本章では，現実環境における MAC フレーム送信成功間隔の分布範囲と端末一台あたりの DCCP 受信レートの関連性を実測によって確認し，現実環境における高精度な送信レート推定手法について議論する．

3.1 実験概要

静岡大学構内にて，シミュレーションと同様図 1 のネットワークトポロジを構築し実測を行った．有線リンク区間はギガビットイーサネットで構成した．ルータ，および端末は Linux OS を搭載した PC である．Linux のカーネルのバージョンは，ルータが 2.6.25.10, 端末が 2.6.25.9 である．

無線端末は AP (Cisco AIRONET 1200) に IEEE802.11b で接続する．この時，無線インターフェースには Intel(R) PRO/Wireless 3945ABG Network Connection adapters を使用した．通信レートは 11 Mbps に固定した．構内には一般的な用途で用いられる AP が存在しているため，本実験で使用した



(a) # of DCCP nodes: 1　(b) # of DCCP nodes: 2　(c) # of DCCP nodes: 3

図 3　現実環境におけるプローブパケット受信間隔分布（接続 DCCP 端末 1〜3 台）

APには，他のチャネルとの競合が可能な限り発生しないようなチャネルを選択した．ただし，近接チャネルを用いて通信を行っているAPに関連するトラヒックの影響を完全に排除できる状況ではない．実際に使用したチャネル番号は 7 (2.452 GHz) である．また，AP の送信電力は 30 mW とした．

DCCP 端末のトラフィックは iperf を用いて生成した．無線側の端末，および有線側の端末から，トランスポート層に DCCP CCID3 を用いて，実験開始から 1800 秒間データを送信させた．アプリケーションのデータサイズは 1400 bytes である．

プローブパケットジェネレータは，56 bytes の UDP パケットを 0.2 秒間隔で送信するものとした．実測環境において MAC フレーム送信成功間隔を取得する事が困難であったため，プローブパケット受信間隔をサンプルとして測定した．これは，プローブパケットジェネレータからプローブパケットレシーバまでの経路において，ボトルネックは無線リンク部分である事，またフレームの送信成功間隔に注目している事から，レシーバのプローブパケット受信間隔を測定がジェネレータの送信成功間隔の測定の代用となると考えられるためである．

評価に用いる値は測定開始後 0 秒から 1700 秒までの 1700 秒間に得られたものとした．

3.2 測定結果

図 3 に現実環境におけるプローブパケット受信間隔の分布を示す．シミュレーション結果と同様，端末台数が 1 台の場合には 200 msec 付近に分布が集中するものの，受信間隔の分布範囲は 100〜300 msec と，シミュレーションに比べて広範囲に分布している事が分かる．この傾向は端末台数が増加するに従ってさらに顕著に現れる．また，端末台数の増加に伴い，0〜50 msec という短い受信間隔の分布が確認できるようになる．この事から，シミュレーション環境でのプローブパケットジェネレータの MAC 層挙動と実測でのそれを比較した場合，両者は同様の傾向を示すものの，分布範囲に差異が生じると言える．これは，現実環境においては電波干渉の影響があるため，これによるキャリアセンスの発生や，無線誤りの影響を受けた MAC フレームの送信失敗による MAC フレームの再送回数の増加が原因であると考えられる．

DCCP 端末台数	プローブパケット 受信間隔分布範囲	DCCP 端末 平均受信レート
1	200 ±28 (msec)	6,893 (kbps)
1	±26	6,922
1	±25	6,880
2	±115	3,142
2	±150	3,185
2	±145	2,537
3	±200	1,947
3	±194	2,403
3	±200	2,061

表 2　プローブパケット受信間隔分布範囲と DCCP 端末平均受信レートの関係

表 2 に，DCCP 接続台数が 1 から 3 台接続する環境における，プローブパケット受信間隔の分布範囲と DCCP 平均受信レートを示す．各条件で 3 回試行を行い，測定値を得た．プローブパケット受信間隔の分布範囲は，1 回の試行で得られたサンプルのうち 95% が存在する範囲とした．この結果から，DCCP 受信レートの減少が減少するに従ってプローブパケット受信間隔分布範囲が広がるという傾向が確認できるものの，現実環境においては理想環境に比べてプローブパケット受信間隔分布範囲が広くなる傾向にある事が分かる．この事から，DCCP 端末が 4 台以上存在するような混雑した環境を想定した場合，200 msec 間隔で送信されるプローブパケットの受信間隔分布範囲と DCCP 受信レートの関係性を得るのは困難である．

4. プローブパケットを用いた DCCP 送信レート推定

これまでのシミュレーションおよび測定から，プローブパケットジェネレータのフレーム送信成功間隔の分布範囲と DCCP 受信レートとの間に関連性が見られる事が分かった．本章ではこの関連性に注目し，プロー

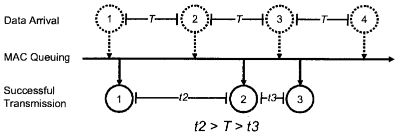
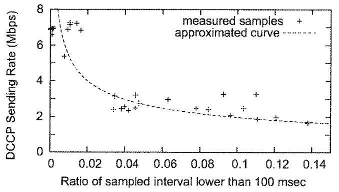
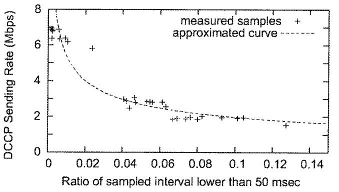


図 4 MAC 層のキューイングディレイが送信フレーム伝送成功間隔に与える影響



(a) プローブパケット生成間隔 200 msec



(b) プローブパケット生成間隔 100 msec

図 5 プローブパケット受信間隔が 100msec 以内のサンプル存在割合と DCCP 受信レートの関係

ブパケット受信間隔から DCCP 送信レートを推定する方法について検討する．

4.1 プローブパケットの短受信間隔存在割合を用いた DCCP 送信レート推定

図 2 によると，現実環境においては DCCP 端末台数の少ない環境でもプローブパケット受信間隔の分布範囲が広くなる．これは，電波干渉によるキャリアセンス時間および再送回数の増加が原因であると考えられる．そのため現実環境においては，ある一定の間隔でプローブパケットを生成した場合に，MAC 層においてフレーム送信遅延が著しく大きくなる．この場合，図 4 伝送に成功したフレームと，次に MAC 層送信バッファに到着するフレームとの間隔はパケット生成間隔よりも短くなる．このフレームは MAC 層送信バッファに到着後，短時間で送信される可能性が高いので，この結果プローブパケット受信間隔が短くなる傾向が高い．

このような特徴から，電波干渉が発生する現実環境においては，プローブパケット生成間隔を大きく下回るようなプローブパケット受信間隔や プローブパケット生成間隔を大きく上回るようなプローブパケット受信間隔が存在する可能性が高いと推測できる．そこで本稿では，プローブパケット生成間隔の半分以下となるようなプローブパケット受信間隔を短受信間隔と定義し，取得したサンプルのうち，短受信間隔が得られたサンプルの割合を基にした送信レート推定方法について検討する．

図 5 に，現実環境における，測定されたプローブパケット短受信間隔の存在割合と受信レートの関係を点で示す．(a) はパケット生成間隔が 200 msec 間隔の場合，(b) はパケット生成間隔が 100 msec 間隔の条件で測定を行った結果である．測定期間は共に 1500 秒間である．短受信間隔の存在する割合が増加するにつれて，端末一台あたりの受信レートが減少する傾向が確認できる．また，同図において，プローブパケット短受信間隔の存在割合と受信レートの関係を表す近似曲線を線で示す．この近似曲線はいずれも $y = 900x^{-0.4} - 300$ で表される曲線である．実測値と近似曲線に誤差が見られるものの，多くの部分で送信レート推定値と実測受信レートとの誤差は ±500 kbps 以内である事から，近似曲線を用いた送信レート推定が行える可能性が高い．具体的には，今回の環境においては，

(1) プローブパケット受信間隔を一定数以上測定する．
(2) 得られた受信間隔を用いて短受信間隔の存在割合を計算する．
(3) 短受信間隔存在割合を近似曲線に代入して送信レートを推定する．

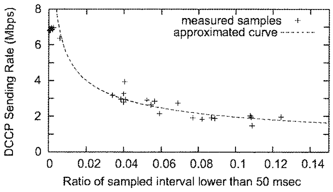
という手順によって推定が可能である．

5. 現実環境での運用課題

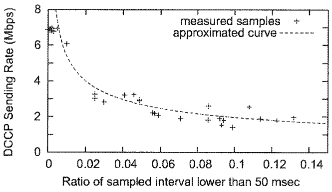
本章では現実環境での運用を前提に，送信レート推定を行う場合に必要な短受信間隔測定期間および得られる送信レートの有効性について議論する．

図 5 の理想曲線は 1500 秒間の測定によって得られたものであるが，実際の運用においてはより短い時間，例えば数秒間，長くとも 200 秒間の測定によって高精度の送信レート推定が出来る事が望ましい．

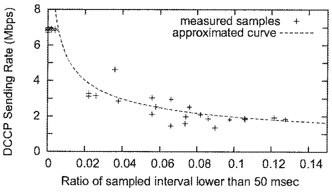
図 6 に，現実環境における，測定期間が測定されたプローブパケット短受信間隔存在割合と受信レートの関係に与える影響を示す．プローブパケット生成間隔は 100 msec である．(a) は測定期間 200 秒間，(b) は測定期間 100 秒間，(c) は測定期間 50 秒間で得られた値である．また，近似曲線は図 5 と同様いずれも $y = 900x^{-0.4} - 300$ で表される曲線である．測定期間が 100〜200 秒間という中期間の測定によって，1500 秒間という長い期間で測定された際と同様，短受信間隔存在割合と受信レートとの関係性が得られる



(a) 測定期間 200 秒



(b) 測定期間 100 秒



(c) 測定期間 50 秒

図 6 測定期間が短受信間隔存在割合と受信レートの関係に与える影響

事，50 秒間という短期間では，短受信間隔存在割合と受信レートとの関連性が弱まる事が分かる．この事から，短受信間隔存在を用いた送信レートを高精度に行うためには，100 秒間の測定が少なくとも必要である事といえる．これは，100 秒間のネットワーク測定によってその間に算出可能な送信レートの平均値を推定すると考える事ができる．

本手法は，DCCP CCID3 といった，ビデオストリーミング向けトランスポートプロトコルの送信レート推定を想定している．これらトランスポートプロトコルは，長期的なスループットが TCP と同程度となるように緩やかな送信レート制御を行うよう設計されている．この事から，100 秒間という比較的長い期間のネットワーク測定で得られた送信レート推定値を用いた場合にも，急激な帯域変動が発生しない環境であれば十分な効果が期待できる．しかしながら，測定期間中に新たなビデオストリーミングアプリケーションが通信を開始する，もしくはそれらアプリケーションが通信を終了するなど，長期的に高負荷なトラフィックを生成する端末が増減した場合には，得られる送信レート推定値と端末がハンドオーバを行った時点で利用可能な送信レートとの間に差が生じる可能性がある．

6. まとめと今後の課題

本稿では，シミュレーションによって電波干渉の無い理想的な環境下において，DCCP 送信レートとプローブパケット受信間隔との間に強い関連性が存在する事を示した．また，この関連性に注目し，プローブパケット短受信間隔存在確率を用いた送信レート推定方法を提案した．電波干渉の影響が強い環境においても，プローブパケットの短受信間隔によって送信レートの推定が可能である事を確認した．これにより，100 msec 間隔で生成されるプローブパケットを用いて 100 秒間測定を行うことで，DCCP 送信レートを推定できる事が分かった．また，運用を想定し，推定に必要なサンプルサイズおよび得られた送信レート推定値の有効性について検討を行った．今後の課題として，検討した手法を用いた送信レート推定の精度および有効性評価がある．

参 考 文 献

1) S. Floyd, M. Handley, J. Padhye, J. Widmer, TCP Friendly Rate Control (TFRC): Protocol Specification, RFC 5348, http://www.faqs.org/rfcs/rfc5348.html, 2003.
2) Yuta Otsuka, Daisuke Tamura, and Susumu Ishihara, "Effects of Handover on Wireless LANs on TFRC Rate Control," in proc. of the the 10th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2007), pp.140–144 (2007-12, Jaipur, India).
3) A. Gurtov, J. Korhonen, "Effect of Vertical Handovers on Perforance of TCP-Friendly Rate Control", ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, pp.73–87, 2004.
4) D. Tamura, G. Miyamoto, M. Kuroda and S. Ishihara, "Predictive rate control for video stream on handover on wireless LAN," in proc. of the the 9th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2006), pp.615–619, 2006.
5) 田村大輔, 大塚裕太, 石原進 "無線 LAN ハンドオーバ時の DCCP 予測レート制御のためのジッタ観測値利用の検討", 電子情報通信学会技術報告. MoMuC, モバイルマルチメディア通信 IEICE technical report, Vol. 107 No. 446, pp.25–30, 2008.
6) E. Kohler, M. Handley, S. Floyd, Datagram Congestion Control Protocol (DCCP), RFC 4340, http://www.faqs.org/rfcs/rfc4340.html, 2006.
7) 大塚裕太, 石原進, "無線 LAN ジッタ測定による DCCP 送信レートの推測", 電子情報通信学会技術報告. MoMuC, モバイルマルチメディア通信 IEICE technical report, Vol.18, No.218, pp. 45–50, 2008.
8) 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.