

マルチホーム環境における帯域集約のための リンク層情報を利用したコネクション制御手法

小口 潔^{†1} 田中大吾^{†1}
友澤 弘充^{†1} 重野 寛^{†2}

近年、無線アクセス技術が発展し、複数の通信インタフェースを備えて複数のネットワークに接続できる、マルチホーム環境を備えたモバイルホストが登場してきている。マルチホーム環境の利用方法の1つとして帯域集約があり、帯域集約によって転送速度の増加や高品質な通信サービスの提供が可能となる。しかし帯域集約を実現するにあたり、無線リンク特性による通信能力低下が大きな問題となる。特に複数経路中の単一リンクにおいて無線リンクが遮断されてパケットが届かなくなる blackout が発生した際には、その経路で転送されるパケットが受信側に到達しないことで受信側のバッファ処理が滞り、通信の停滞が起こる。既存手法においてもこの現象への対処を考えているが、その対処はTCPのタイムアウトを利用するものであり、回復にはTCPタイムアウトを待つ必要がある。よって本論文では、無線リンクを含んだマルチホーム環境で帯域集約を行う際に問題となる blackout の悪影響を軽減するために、リンク層情報を利用してコネクション制御を行うLCCを提案する。さらにシミュレーションによって、LCCがblackoutに既存方式よりも早く対応でき、blackoutの影響を緩和できていることを示す。

Link-based Connection Control for Bandwidth Aggregation in Multi-home Environment

KIYOSHI OGUCHI,^{†1} DAIGO TANAKA,^{†1}
HIROMITSU TOMOZAWA^{†1} and HIROSHI SHIGENO^{†2}

In recent years, wireless access technologies are developed and mobile hosts with multi-homed environment which can connect to multiple networks with their network interface cards are being appeared. One way of using multi-homed environment is to aggregate bandwidth. By bandwidth aggregation, it is possible to provide more bit rates and high QoS. However when bandwidth aggregation actualized, different link characteristics, such as wireless links, lead to bad network capacity. Especially in case of blackout caused by wireless link

shut down in one link, it makes packets unable to reach the receiver. Because of the packet with blackout link cannot reach the receiver, the buffer process stops and connection refuses. Related works also consider about this issue, but they use TCP timeouts and this takes time to restart connection. In this paper, we propose LCC, which uses link layer information to control connections for reducing blackout effects. Simulation results show that LCC adapts more quickly against blackouts, and reduces blackout effects.

1. はじめに

近年、モバイルホストにおいて無線インタフェースを複数搭載したマルチホーム環境を備えた製品が登場してきており、マルチホーム環境の利用方法の1つである帯域集約の研究も活発となってきている。表1に各層での帯域集約の特徴を示す。データリンク層での帯域集約は、複数のチャネルを1本の論理リンクとして束ねる multi-link PPP¹⁾ 等が提案されているが、専用のハードウェアが必要なため異なるISP間で障害が生じる可能性がある。ネットワーク層では、QoSルーティング、マルチパスルーティング等のコンテキストでパケットを複数の経路を利用して伝送することが試みられている²⁾⁻⁴⁾ が、ネットワーク全体におけるトラフィックの制御を問題としている。また、アプリケーション層での提案も多々あるが、これらは経路数の変動に対し使用中のトランスポート層コネクションを切断しなければならない、またスループットの低いパスに転送時間が支配されることが問題点となっている。上記の研究に対しトランスポート層では、End-to-Endでのサポートが必要ではあるが、下層や通信環境の変動に対して柔軟にコネクション維持できる⁵⁾。

トランスポート層で帯域集約を実現しようとする際、問題となるのが無線リンク特性である⁶⁾。無線リンクはロス率⁷⁾、帯域幅、遅延^{8),9)}、ジッタ等スムーズな通信をするうえで考慮すべき要素が多くあり、このような特性に対処していくことが必要となる。この無線リンク特性の1つにblackoutがあり、それへのreactiveな対処を考えたプロトコルとして、pTCP¹⁰⁾、mTCP¹¹⁾がある。しかしこれらの方式では、blackoutの検出にTCPのタイムアウトを利用しており、回復には相当の時間を要する。

本論文では、無線リンクを含んだマルチホーム環境で帯域集約を行う際に問題となる black-

^{†1} 慶應義塾大学大学院理工学研究所

Graduate School of Science and Technology, Keio University

^{†2} 慶應義塾大学理工学部

Faculty of Science and Technology, Keio University

表 1 各層での帯域集約の特徴
Table 1 Feature of bandwidth aggregation at each layer.

	長所	短所
データリンク層	透過性が高い	専用のハードウェアが必要
ネットワーク層	通信相手が経路集約機能をサポートしている必要なし	複数経路間の遅延差, 帯域差への対処が困難
トランスポート層	下層や通信環境の変化に柔軟に対応可能	End-to-End でのサポートが必要
アプリケーション層	実装が容易	スループットの低いパスの影響大

out の悪影響を軽減するために、リンク層情報を利用してコネクション制御を行う LCC を提案する。本提案では、無線基地局と送信ノードを高機能化する。無線基地局では、リンク観察モジュールと通知モジュールを加えることで、リンク層の情報であるパケットの再送回数等を取扱し、これを送信ノードへ届ける。送信ノードではコネクション制御モジュールを加えることで、得られた情報を TCP コネクション制御に利用する。これは、早期のパケット再配置や輻輳ウィンドウの最大値設定等を行い、blackout による通信の停滞を防ぐものである。LCC が既存 pTCP と比較してより効率的な通信を行えることを、平均スループットやパケット再配置処理量の点からシミュレーションによって示す。

以下、2 章においてマルチホーム環境と帯域集約、既存手法について述べる。その後 3 章で本研究の提案である LCC について説明し、4 章でその評価と考察を行う。最後に 5 章で結論を述べる。

2. マルチホーム環境と既存手法

2.1 マルチホーム環境

無線アクセス技術は現在製品化されているものだけでも IEEE 802.11 シリーズ, Bluetooth, Zigbee 等様々であり、その種類は多岐にわたる。この複数の通信規格に対し、複数のインタフェースを持つ端末が登場してきており、この環境をマルチホーム環境と呼ぶ。現時点では、マルチホーム環境を備えていても、その時点で有効なインタフェースの中から 1 つを選択して利用する使い方が一般的であるが、将来的には複数のインタフェースを同時に使用したり、積極的に相互補完して使用したりする技術が期待される。

無線リンクを含むようなネットワークのトポロジ¹²⁾として、経路の一端に無線リンクが含まれるトポロジ、経路の中もしくは両端に複数の無線リンクが含まれるトポロジ、また極端なトポロジとして、ネットワーク全体が複数の無線リンクで構成されるトポロジがある。

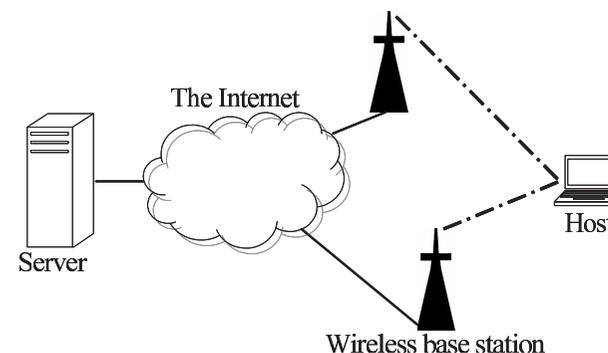


図 1 ネットワークモデル
Fig. 1 Network model.

本論文では、図 1 のように一般の端末が複数の無線環境を利用してサーバにアクセスするような環境を想定し、経路の一端に無線リンクが含まれるトポロジを想定した提案を行う。具体的には、送信ノードと無線基地局間が有線リンクで接続されており、無線基地局と受信ノード間が複数の無線リンクで接続されている環境を想定する。

2.2 帯域集約と既存手法

トランスポート層において帯域集約を実現する際、無線リンク特性について考慮する必要がある^{13),14)}。ここでは考慮すべき無線リンク特性として blackout を取り上げ、blackout の結果発生するヘッドオブラインブロッキング、そして通信の停滞について説明する。blackout とは、無線リンクにおいて何らかの理由で通信が遮断され、パケットがまったく届かなくなる状況である。マルチホーム環境において複数のリンクを用いて帯域集約を行っている際、その中の 1 つのリンクに blackout が発生すると、そのリンクに割り当てられたパケットの通信が滞る。特に集約されたリンク上で TCP のような信頼性のあるトランスポート層プロトコルを使用している場合、blackout が発生したリンクに割り当てられたパケットの到着待ちによって全体の通信が停滞する現象が発生する^{15),16)}。これをヘッドオブラインブロッキングと呼ぶ。

blackout によって生じるヘッドオブラインブロッキングへの対処は、reactive アプローチと proactive アプローチに分類できる。reactive アプローチは blackout が発生した後に対処する方法であり、blackout 検出にかかるコストが小さいという利点があるが、回復に時間がかかる。それに対し proactive アプローチは、blackout の発生を予測して対処する

方法であり, blackout からの回復を早くすることができるが, blackout の発生予測のためのコスト, 予測を誤ったときのペナルティ等の欠点がある. トランスポート層において帯域集約を実現することを目的としたプロトコルとして, R-MTP¹⁷⁾, MP-TCP¹⁸⁾, pTCP (parallel TCP)¹⁰⁾, mTCP¹¹⁾ がある. R-MTP は, 使用可能な帯域を遅延によって推定し, 帯域集約に利用する rate-based プロトコルである. しかし, 遅延によって送信レートを制御する仕組みはあるものの, blackout に特別な対処を講じているわけではない. MP-TCP は, 独自のヘッダを用いないために, 受信側での改変を必要とせず帯域集約が行えるプロトコルであるが, この方式もまた blackout への特別な対処は考えていない. pTCP では, blackout によって生じるヘッドオブラインブロッキングに対しては, blackout が発生したコネクションの packets を発生していないコネクションに再配置することによって対処しているが, この再配置は TCP の再送タイムアウトするまでは実行されない. 無線リンクでは, 輻輳以外の要因で packet loss が発生しやすい⁷⁾ ため, タイムアウトが発生しやすい. そのため TCP 再送タイムアウト値が大きくなりやすく, blackout からの回復に時間がかかる. mTCP では, リンク障害が発生した際, これを障害検出タイムによって検出して回復する機能がある. しかしこのリンク障害の検出と回復においても, 障害検出タイムアウト値にはリンクごとの TCP 再送タイムアウト値の整数倍が用いられているため, 無線リンクにおける blackout の影響が大きくなる. これらの方式のうち, blackout に対して proactive な対処を行っているものはなく, pTCP と mTCP はトランスポート層レベルでの reactive アプローチを行っている. これに対して本論文では, blackout に対して proactive な処置を行い, blackout からの回復を速める方式を提案する.

3. LCC (Link-based Connection Control)

本章では, 無線リンクを含んだマルチホーム環境で帯域集約を行う際に問題となる blackout の悪影響を軽減するために, リンク層情報を利用してコネクション制御を行う LCC (Link-based Connection Control) を提案する. 本提案では, 送信ノードと無線基地局間が有線リンクで接続されており, 無線基地局と受信ノード間が複数の無線リンクで接続されている環境を想定し, クロスレイヤ手法によって blackout の発生を事前に予測し対応することにより, blackout による通信の停滞を回避する. blackout の発生予測は, 無線基地局で無線リンク品質を観察することによって行う. そしてその観察結果を送信ノードに通知し, 無線リンク品質に応じてリンク間での packet 再配置や輻輳ウィンドウ制御を行う.

無線リンクの品質としてはフレーム誤差率 (FER), データレート, 電波強度等があり,

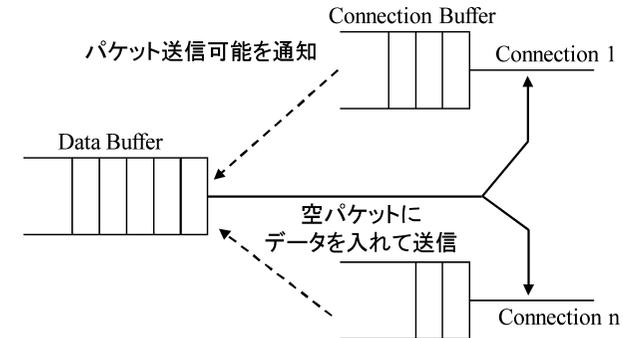


図2 コネクションモデル
Fig.2 LCC connection model.

それらを測るメトリックとして, 受信電波強度, リンク層再送回数等が考えられる^{19),20)}. しかし受信電波強度を用いようとする, 受信電波強度がどの範囲にあれば無線リンク品質が良いかという判断が困難である, Auto Rate Fallback (ARF)²¹⁾ によって通信途中でデータレートが変更されて受信閾値が変動してしまうことがある, 受信電波強度が無線リンクごとに固有である等の欠点がある. これに対してリンク層再送回数は, 受信電波強度と比較して値が離散的であるため判断が容易であり, 値の変動が少なく, 一般化がしやすいと考えられる. 以上のことから, 本提案ではリンク層再送回数を使用して無線リンク品質を判断する.

無線リンク品質を観察する機能をどこに持たせるかという問題には, 受信ノードと無線基地局が選択肢としてあげられる. しかし受信ノードで無線リンクを観察すると, 無線リンク品質が悪化して送信ノードに通知を行いたいときに通知パケットが届かない可能性がある. また blackout が発生してしまうと, 送信ノードとの連絡は不可能になる. これに対して無線基地局で無線リンクを観察すると, 送信ノードへの通知が速やかに行え, また無線リンク品質が悪いときにも通知が行える. これらのことから, 無線基地局で無線リンクを観察することが適切であると考えられ, 本提案では無線基地局で無線リンクの観察を行う.

図2にLCCのコネクションモデルを示す. LCCでは, pTCPと同様に, 経路1本につき1つのTCPコネクションを使用する. そしてコネクションごとにTCPの状態情報を管理して輻輳制御を行う. また, それぞれのコネクションはTCPのヘッダのみの空パケットを生成し, そのパケットが送信できるときに初めてデータが割り当てられ, 送信される. そ

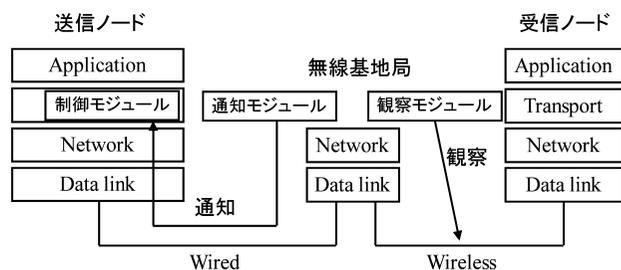


図3 プロトコルモデル
Fig. 3 LCC protocol model.

それぞれのコネクションでパケットが受信されると、そのパケットはコネクションレベルで順序制御された後に、集約フローレベルで順序制御される。この集約フローレベルでの順序制御には、pTCPと同様に集約フローでのシーケンス番号の入ったヘッダを用いて解決している。

このシステムモデルにおいて、LCCは無線基地局を高度化して無線リンクを観察し、その情報を送信ノードに通知してコネクション制御に利用する。図3にLCCのプロトコルモデルを示す。具体的には、無線リンク品質を観察するリンク観察モジュールと、リンク情報を送信ノードに通知する通知モジュールを無線リンクと有線リンクの境界にある無線基地局に配置し、またその情報を受け取ってコネクション制御を行う制御モジュールを送信ノードに配置することで、リンク層の情報を送信ノードのコネクション制御に利用する。

以下でリンク観察モジュール、通知モジュール、制御モジュールの働きを説明する。

3.1 リンク観察モジュールによる blackout 予測手法

本提案では、blackoutを予測するために、リンク品質と相関があるリンク層再送回数²²⁾を使用する。リンク層ではフレームの再送は最大で N 回まで実行されるといえる。また、無線リンク品質が悪化し、フレームロス率が高まると、それぞれのフレームでの違いはあるが全般に再送回数は増加していく。この再送回数の増加を観測することで、無線リンク品質の推定を行い、blackoutの発生を予測する。

具体的な手法としては、まず、リンク観察モジュールでフレームをキャプチャすることにより、無線基地局-受信ノード間の無線リンクにおけるリンク層再送回数を観測する。それまで観察していたフレームの中での最大再送回数を R_{max} 、現在送信しようとしているフレームに対応する再送カウンタの値を R_{cur} とすると、 $R_{cur} > R_{max}$ が成立するとき、リ

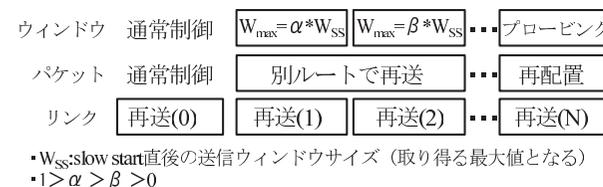


図4 コネクション制御手法の決定
Fig. 4 Connection control decision.

ンク観察モジュールは再送回数 R_{cur} とそれに対応するフレーム中のTCP/IPヘッダから情報を取得する。情報を取得した後、リンク観察モジュールはその情報を通知モジュールに渡す。また、最大再送回数 R_{max} には再送回数タイマが設定されており、一定時間最大再送回数 R_{max} の更新が行われないうち、最大再送回数 R_{max} は0にリセットされる。

3.2 通知モジュールによる通知手法

通知モジュールは観察モジュールから情報を取得すると、取得した情報をもとに制御パケットを作成する。この際、確認応答パケットのフォーマットに準じて作成される。しかし、通常の確認応答パケットとは互換性がなく、またヘッダからLCCが送信側で使用されているかどうかを判断し、使用されていない際にはこの制御パケットは送信されない。制御パケットにはリンク層再送回数 R_{cur} とTCPシーケンス番号を付加し、制御パケットであることを示すために制御フラグを用意し、これをONにする。そして無線基地局の通知モジュールから、送信ノードの制御モジュールへ制御パケットが送信される。

3.3 制御モジュールによるコネクション制御手法

送信ノードは無線基地局で作成された制御パケットを受信すると、そのパケットのIPアドレス、ポート番号からコネクションを特定し、コネクション制御手法を決定する。図4にコネクション制御手法の決定を示す。コネクション制御手法の決定には、リンク観察モジュールで観測されたリンク層再送回数 R_{cur} が用いられる。コネクション制御手法にはそのコネクションのみで行うウィンドウ制御と、集約フロー単位で行うパケット割当て制御がある。ウィンドウ制御は最大値設定とプロービングに分けられる。最大値設定は、輻輳ウィンドウに最大値 W_{max} を設けて、輻輳ウィンドウ $cwnd$ が $cwnd > W_{max}$ となった際に輻輳ウィンドウ $cwnd$ を半減させるもので、リンク層再送回数 R_{cur} が少ないときに行われる。これにより、blackoutとそれともなうパケット再配置処理に備え、輻輳ウィンドウサイズを低く保つ。その際、リンク層再送回数 R_{cur} に応じて最大値 W_{max} の値を小さくする。

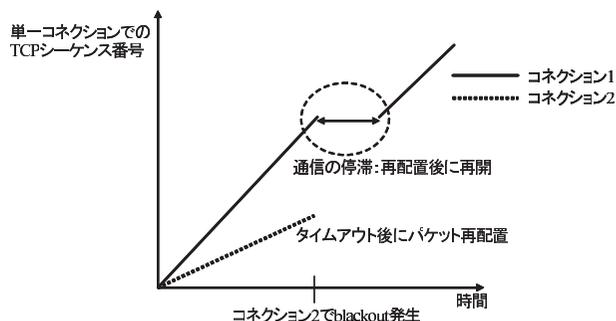


図 5 pTCP の動作例

Fig. 5 Operation images of pTCP.

具体的には、スロースタート直後の送信ウィンドウサイズ W_{ss} (スロースタート閾値の 2 倍となる) に対して、 $W_{max} = \alpha \times W_{ss}$ ($\alpha < 1$) のように最大値 W_{max} を設定する。プローピングは、1 パケットを定期的に送って障害の回復を待つもので、リンク層再送回数 R_{cur} が最大値 N に達したときに行われる。

パケット割当て制御は別ルート再送とパケット再配置に分けられる。別ルート再送は、リンク層再送回数が増加したパケットを制御情報中の TCP シーケンス番号を使用して別の接続で再送するもので、リンク層再送回数が少ないときに行われる。これにより、TCP の再送処理より早くリンク層再送回数が増加したパケットを送信することができる。パケット再配置は、接続の送信バッファに入っているすべてのパケットを別の接続の送信バッファに再配置するもので、リンク層再送回数が最大値 N に達したときに行われる。これにより、受信側に届いていないパケットすべてを別接続で再送することができる。また、無線リンクが 3 つ以上ある場合、別ルート再送、パケット再配置はその時点で最も TCP 接続の輻輳ウィンドウが大きいリンクで行われる。

3.4 動作例

既存手法 pTCP と本提案手法 LCC の動作例を図 5、図 6 に示す。pTCP では、blackout が発生した際に一方の接続の通信がストップする。このとき、pTCP のもう一方の接続でも、ヘッドオブラインブロッキングによって通信の停滞が発生する。その後 blackout が発生した接続でタイムアウトが起き、パケットの再配置を行うことでもう一方の接続で通信が再開される。しかしこのタイムアウトを待つ間は blackout の発生していない接続でも通信が停滞する。それに対して LCC では、リンクの情

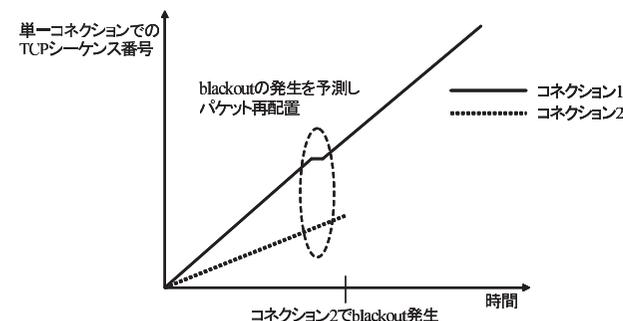


図 6 LCC の動作例

Fig. 6 Operation images of LCC.

報を送信側に提供することで前もってパケット再配置を行うことができ、blackout の発生していない接続が blackout による影響を受けることなく通信を継続できる。

4. 評価

本章では、LCC の有効性を示すために、計算機シミュレーションによって評価する。

4.1 シミュレーション環境

シミュレーショントポロジを図 7 に示す。また、シミュレーションパラメータを表 2 に示す。本シミュレーションでは、送信ノードから無線基地局が有線リンクで結ばれ、無線基地局から受信ノードに無線リンクが 2 本あるような環境を想定する。

上記の条件の下で、提案手法 LCC の評価を行う。本論文では、比較対象として pTCP を用いる。2.2 節で述べたように、pTCP は TCP 再送タイムアウトによって blackout に対処しており、他の既存手法の mTCP 等よりも優れていると考えられる。シミュレーション結果は、送出パケットのシーケンス番号の推移を除き、シミュレーション 10 回の平均値であり、信頼区間は 95% である。以下に評価項目を示す。

- (1) 送出パケットのシーケンス番号の推移
- (2) blackout が発生した際の平均スループット
- (3) blackout が発生した際のパケット再配置処理量
- (4) blackout が発生しなかった際の平均スループット

blackout が発生した際の平均スループットでは、blackout 発生モデルとして、無線環境が徐々に悪化していくようなフレームロス率が線形に増加するモデルと、無線環境が急激

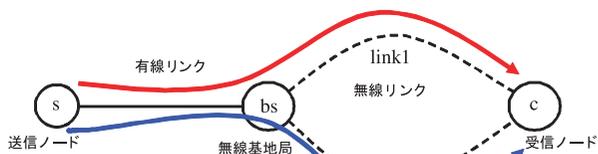


図 7 シミュレーショントポロジ
Fig. 7 Simulation topology.

表 2 シミュレーションパラメータ
Table 2 Simulation parameters.

シミュレータ	QualNet version 3.9.0 ²³⁾
無線リンク	IEEE 802.11 a/b
最大再送回数	$N = 3$
有線リンク	10 Mbps
フレームロス率	可変
集約フロー数	1 本
LCC パラメータ	$\alpha = 1/2, \beta = 1/4$
TCP セグメントサイズ	512 byte
トラフィックタイプ	FTP

に悪化するような指数的に増加するモデルについて評価を行った。また、リンク層再送回数によって blackout に対して proactive な対処を行うことの弊害を調べるために、blackout が発生しなかったときについても評価を行った。

4.2 シミュレーション結果

4.2.1 送出パケットのシーケンス番号の推移

片方のリンクでフレームロス率が線形に 10%まで増加し、100 秒後に blackout が発生するときの単一のコネクションの TCP シーケンス番号の推移を図 8 と図 9 に示す。それぞれ、横軸に時間を、縦軸に単一のコネクションの TCP のシーケンス番号を示している。図 9 の pTCP のシーケンス番号の推移では、blackout が発生するまでは双方のコネクションで順調にシーケンス番号が増加していくが、100 秒に blackout が発生した際には、blackout が発生していないコネクション 1 にも影響を与えてしまっている。それに対し図 8 では、100 秒に blackout が発生したときにもコネクション 1 の通信を妨げることなく、順調に通信が

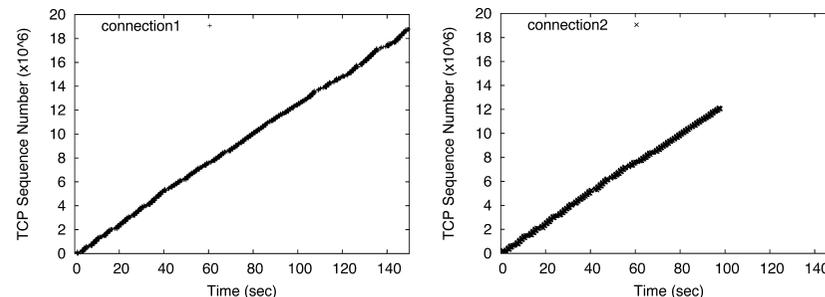


図 8 LCC の送出パケットのシーケンス番号の推移
Fig. 8 Sequence number progression of LCC.

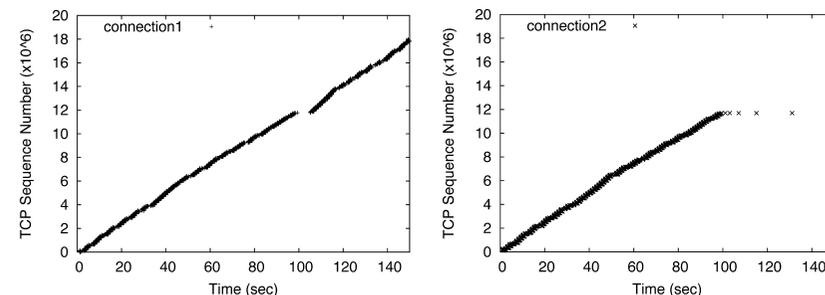


図 9 pTCP の送出パケットのシーケンス番号の推移
Fig. 9 Sequence number progression of pTCP.

行えていることが分かる。

4.2.2 blackout が発生した際の平均スループット

片方のリンクでフレームロス率が線形に最大フレームロス率まで増加し、100 秒後に blackout が発生するときの平均スループットを図 10 に、指数的に増加するときの平均スループットを図 11 に示す。これらの図では、縦軸に 2 リンクの合計スループットを示している。図 10、図 11 とともに、全般に LCC が pTCP を上回っているのが分かる。図 10 を見ると、最大フレームロス率が 0.025 以下と 0.05 以上で特性が異なっている。最大フレームロス率が 0.025 以下のときは、LCC、pTCP とともに最大フレームロス率増加にともなって減少している。これは、フレームロスが発生したもののタイムアウトが発生せず、リンク層再送で

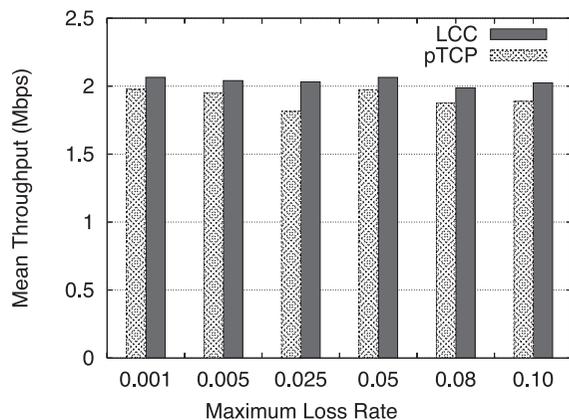


図 10 線形増加モデルでの平均スループット

Fig. 10 Mean throughput when frame loss rate linearly increases.

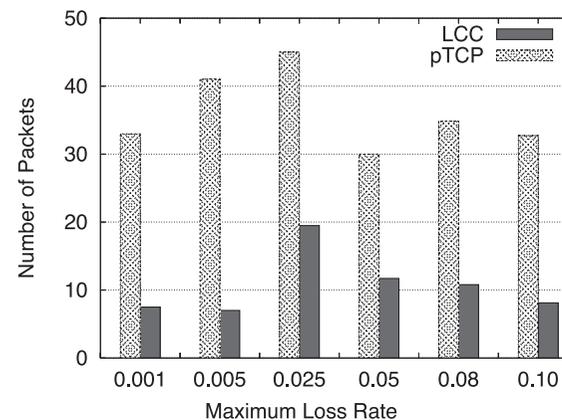


図 12 線形増加モデルでのパケット再配置処理量

Fig. 12 Packet reassignment when frame loss rate linearly increases.

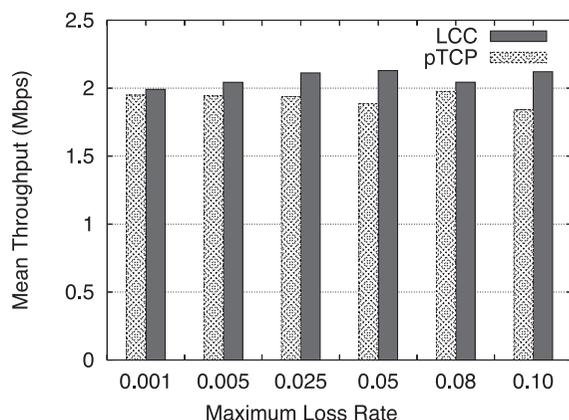


図 11 指数増加モデルでの平均スループット

Fig. 11 Mean throughput when frame loss rate exponentially increases.

対応できたことを示している。この状況において、LCC はリンク層再送回数によってリンク状況の悪化を検知し、輻輳制御に反映させることで、pTCP より良いスループットを得ることができた。また、最大フレームロス率が 0.05 以上のときは、フレームロスがリンク層

再送で解決できずタイムアウトが発生した。そのため、結果的にパケット再配置が blackout の発生前に起こり、若干 pTCP のスループットが 0.025 以下のときに比べて上昇している。図 11 では、最大フレームロス率が 0.05 以下と 0.08 以上で特性が異なっている。この図 10 と異なる特性は、フレームロス率が指数的に増加することから、タイムアウトが線形増加モデルと比較して起こりにくいと考えられる。最大フレームロス率が 0.05 以下のとき、最大フレームロス率が高くなるにつれて LCC のスループットは高くなり、pTCP のスループットは低下する。これは、最大フレームロス率が高くなるにつれてリンク層再送回数の増加が発生しやすくなるためである。また、最大フレームロス率が 0.08 以上のときは、図 10 と同様にタイムアウトが発生し、パケット再配置が blackout の発生前に起こったためと考えられる。線形増加モデルではスループットが 5% から 12%、指数増加モデルでは 2% から 15% の改善が確認できた。

4.2.3 blackout が発生した際のパケット再配置処理量

片方のリンクでフレームロス率が線形に最大フレームロス率まで増加し、100 秒後に blackout が発生するときのパケット再配置処理量を図 12 に、指数的に増加するときのパケット再配置処理量を図 13 に示す。これらの図では縦軸に blackout が発生した際に再配置されたパケットの個数を示している。図 12、図 13 とともに、全般に LCC の再配置処理量が pTCP を下回り、blackout の影響を小さくできていることが分かる。特に図 12 では、パケット

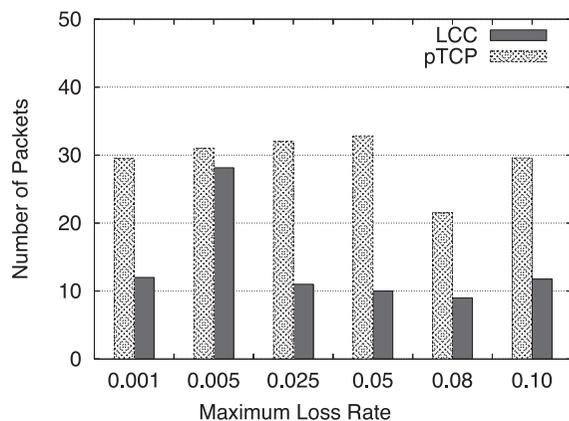


図 13 指数増加モデルでのパケット再配置処理量

Fig. 13 Packet reassignment when frame loss rate exponentially increases.

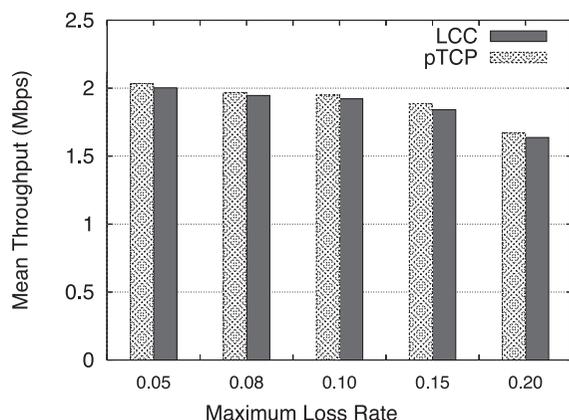


図 14 blackout が発生しなかった際の平均スループット

Fig. 14 Mean throughput with no blackout.

再配置処理量が pTCP に比べて 2 分の 1 以下になっている。これは、フレームロス率が線形に増加するためにリンク層再送回数の増加が起こりやすく、blackout 発生前に LCC のウィンドウ制御を行えたことを示している。また最大フレームロス率が 0.05 を境に LCC、

pTCP とともに再配置処理量が少なくなっているのは、図 10 と同様にタイムアウトの影響だと考えられる。

4.2.4 blackout が発生しなかった際の平均スループット

片方のリンクで最大フレームロス率まで線形にフレームロス率が上昇するが、blackout が発生しない場合の平均スループットを図 14 に示す。図 14 では縦軸に平均スループットを示している。全般に LCC は pTCP に比べて平均スループットが低くなっていることが確認できる。これは、リンク状況の観察により、リンク層再送回数の上昇から輻輳ウィンドウを抑制したためである。しかし、輻輳ウィンドウをスロースタート直後の半分に抑制したことを考えると、スループットの減少率は小さいといえる。

5. おわりに

本論文では、無線リンクを含んだマルチホーム環境で帯域集約を行う際に問題となる blackout の悪影響を軽減するために LCC を提案した。LCC は、無線基地局に無線リンク品質を観察するリンク観察モジュールと送信ノードに通知する通知モジュールを配置し、送信ノードにコネクション制御を行う制御モジュールを配置することで、リンク層の情報を送信ノードのコネクション制御に利用できる。そのため、blackout の発生を予測し対応することができ、blackout による通信の停滞を回避が可能である。評価実験を通して、LCC は既存手法 pTCP と比べて blackout の悪影響を軽減できたことを、平均スループットやパケット再配置処理量等の点から示した。なお、本研究では、IEEE 802.11 方式に特化した値を使用しており、これは IETF で規格化が行われている²⁴⁾。また、本論文では評価の比較対象として pTCP を用いた。今後の課題として、他のトランスポート層の既存方式をシミュレータ上に構築し、比較することが必要である。

参 考 文 献

- 1) Sklower, K., Lloyd, B., McGregor, G., Carr, D. and Coradetti, T.: The PPP Multilink Protocol (MP), RFC 1990, IETF (1996).
- 2) Phatak, D.S. and Goff, T.: A novel mechanism for data streaming across multiple ip links for improving throughput and reliability in mobile environments, *Proc. IEEE The Conference on Computer Communications (INFOCOM '02)*, Vol.21 (2002).
- 3) Ishihara, S., Koyama, K., Ito, Y., Mineno, H. and Ohta, K.: Sharing multiple paths for temporarily connected mobile computers using Mobile IP, *Proc. IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computer and Signal Processing (PACRIM)*

- '03), Vol.12 (2003).
- 4) Koyama, K., Ito, Y., Mineno, H. and Ishihara, S.: Evaluation of performance of tcp on mobile ip shake, *IPSI Journal*, Vol.45, No.10, pp.2270–2278 (2004).
 - 5) Shi, J., Jin, Y., Guo, W., Cheng, S., Huang, H. and Zchang, D.: Performance Evaluation of SCTP as a Transport Layer Solution for Wireless Multi-access Networks, *Proc. WCNC 2004/IEEE Communications Society*, pp.453–458 (2004).
 - 6) Gurtov, A. and Floyd, S.: Modeling wireless links for transport protocols, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol.34, No.2, pp.85–96 (2004).
 - 7) Nam, C.H., Liew, S.C. and Fu, C.P.: An experimental study of ARQ protocol in 802.11b Wireless LAN, *Proc. Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC '02)* (2002).
 - 8) Ludwig, R. and Katz, R.H.: The Eifel algorithm: Making TCP robust against spurious retransmissions, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol.30, No.1, pp.30–36 (2000).
 - 9) Gurtov, A.: Effect of delays on TCP performance, *Proc. IFIP Personal Wireless Communications (PWC '01)* (2001).
 - 10) Hsieh, H.-Y. and Sivakumar, R.: A transport layer approach for achieving aggregate bandwidths on multi-homed mobile hosts, *Proc. 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom '02)*, pp.83–94 (2002).
 - 11) Zhang, M., Lai, J., Krishnamurthy, A., Peterson, L. and Wang, R.: A transport layer approach for Improving end-to-end performance and robustness using redundant paths, *Proc. USENIX Annual Technical Conference* (2004).
 - 12) Elaarag, H.: Improving TCP performance over mobile networks, *ACM Comput. Surv.*, Vol.34, No.3, pp.357–374 (2002).
 - 13) Inamura, H., Montenegro, G., Ludwig, R., Gurtov, A. and Khafizov, F.: TCP over second (2.5G) and third (3G) generation wireless networks, RFC 3481, IETF (2003).
 - 14) Allman, M., Glover, D. and Sanchez, L.: Enhancing TCP over satellite channels using standard mechanisms, RFC 2488, IETF (1999).
 - 15) Murthy, C.S.R. and Manoj, B.S.: *Ad Hoc Networks: Architectures and Protocols*, Prentice Hall (2004).
 - 16) Hanbali, A.A., Altman, E. and Nain, P.: A survey of tcp over ad hoc networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.7, No.3, pp.22–36 (2005).
 - 17) Magalhaes, L. and Kravets, R.: Transport mechanisms for bandwidth aggregation on mobile hosts, *Proc. IEEE ICNP 2001*, pp.165–171 (2001).
 - 18) Igarashi, K., Shigeno, H., Ihara, T., Miura, A. and Okada, K.: MP-TCP: Transport Layer Protocol for Network Bandwidth Aggregation under Multi-homing Environment, *IPSI Journal*, Vol.47, No.2, pp.308–321 (2006).
 - 19) Teraoka, F., Gogo, K., Mitsuya, K., Shibui, R. and Mitani, K.: Unified Layer 2 (L2) Abstractions for Layer 3 (L3)-Driven Fast Handover, RFC 5184, IETF (2008).
 - 20) Tsukamoto, K., Kashihara, S. and Oie, Y.: A Unified Handover Management Scheme Based on Frame Retransmissions for TCP over WLANs, *IEICE Trans. Communications*, Vol.E-91-B, No.4, pp.1034–1046 (2008).
 - 21) Kamerman, A. and Monteban, L.: WaveLAN II: A High-performance Wireless LAN for the Unlicensed Band, *Bell Labs Technical Journal*, pp.118–133 (1997).
 - 22) Kashihara, S., Tsukamoto, K., Koga, H. and Oie, Y.: Handover Management based on the Number of Frame Retransmissions for VoWLANs, *Proc. 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc '06)*, Poster and Demo Sessions, Florence Italy (2006).
 - 23) QualNet simulator, QualNet user's manual (online). available from <http://www.scalable-networks.com> (accessed 2008-03-01)
 - 24) IEEE 802.11, IEEE 802.11 Standard 1999 Edition (online). available from <http://grouper.ieee.org/groups/802/11> (accessed 2008-03-01)

(平成 20 年 3 月 29 日受付)

(平成 20 年 10 月 7 日採録)



小口 潔 (学生会員)

2007 年慶應義塾大学工学部情報工学科卒業。現在，同大学大学院理工学研究科在学中。トランスポート層プロトコルの研究に従事。



田中 大吾 (学生会員)

2006 年慶應義塾大学工学部情報工学科卒業。トランスポート層プロトコルの研究に従事。2008 年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。現在，NTT コムウェア (株) 勤務。



友澤 弘充 (学生会員)

2008年慶應義塾大学工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科在学中。トランスポート層プロトコルの研究に従事。



重野 寛 (正会員)

1990年慶應義塾大学工学部計測工学科卒業。1997年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。1998年同大学工学部情報工学科助手(有期)。現在、同大学工学部情報工学科准教授。博士(工学)。計算機ネットワーク・プロトコル、モバイル・コンピューティング、ネットワーク・セキュリティ、マルチメディア・アプリケーション等の研究に従事。著書『～ネットワーク・ユーザのための～無線LAN技術講座』(ソフト・リサーチ・センター)、『コンピュータネットワーク』(オーム社)等。電子情報通信学会、IEEE、ACM各会員。