

無線 LAN におけるパケット転送タイミングと輻輳ウィンドウの解析

松井愛子[†]

豊田真智子^{† ‡}

神坂紀久子[†]

小口正人[†]

[†]お茶の水女子大学人間文化研究科数理・情報科学専攻

Analysis of Packets Transportation Timing and Congestion Window in a Wireless Network Environment

Aiko Matsui[†]

Machiko Toyoda^{† ‡}

Kikuko Kamisaka[†]

Masato Oguchi[†]

[†]Ochanomizu University

1 はじめに

近年、無線通信に対する需要がますます高まり、更なるスループットの増大が切望されている。しかし無線通信は有線通信と比べ、帯域が狭いだけでなく、通信効率が著しく低い。その原因として、ワイヤレス LAN においてはノイズ等によるエラー発生頻度が高いことに加えて、有線環境用に開発された TCP プロトコルが無線環境で効率よく機能していない可能性が考えられる。これまで有線環境においては、通信時の TCP プロトコルの振舞を解析し、TCP パラメータを制御することによって通信効率を上げる研究が行われてきた [1]。そこで本研究では、無線通信におけるその手法の応用を検討する。

現在までに、無線通信における TCP プロトコルの研究は盛んに行われてきた [3]。しかしその多くは、スループットやレスポンスタイムの測定など、システム外部からの観察に留まっている。また無線環境に特化した TCP を構築する試みも見られる。それに対し本研究では、既存 OS のカーネル内部の TCP 実装で管理されている TCP パラメータの値を可視化し、そのデータを用いて議論を進める。

2 TCP パラメータの可視化

本研究では無線通信時の TCP パラメータを可視化する。そして、同一条件において、有線通信時・無線通信時の TCP パラメータの振舞を比較・解析することで無線独自の問題点を発見し、無線環境で効率よく通信できるよう TCP パラメータを制御する手法を検討する。

まず、カーネル内部の TCP ソースファイルにモニタ関数を挿入し、再コンパイルしてカーネルを再構築する。その結果、TCP による通信時にパラメータの値がカーネルのメモリ空間に記録され、カーネル外部からそれらの値が確認可能となる。また、モニタしたパラメータを X11 Window システムのライブラリ関数を利用し、リアルタイムにグラフ表示する。TCP パラメータの可視化手法の概念図を図 1 に示す。

[‡] 現在、NTT 情報流通プラットフォーム研究所
NTT Information Sharing Platform Laboratories

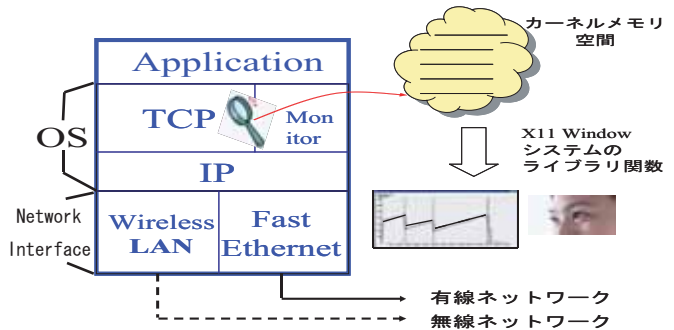


図 1: TCP パラメータの可視化手法の概念図

3 輻輳ウィンドウ

TCP では、輻輳制御において輻輳ウィンドウという概念を用いている。Linux OS の TCP は状態機械として実装されている。パケット送受信における処理は、その状態によって変化する。

輻輳ウィンドウとはネットワークの輻輳制御を目的としてデータ送信側が自主的に制限するためのパラメータで、受信側からの確認応答パケット (=ACK) 無しに連続送信できる最大のパケット数を表す TCP パラメータである。正常な通信時には確認応答を 1 つ受信するごとに増加し、エラーが起こると急激に減少する。エラーには

- ・送信側デバイスドライバのバッファが溢れることによる Local Congestion エラー (CWR)
- ・重複 ACK, SACK を受信 (Recovery)
- ・タイムアウトを検出 (Loss)

の 3 つがある。これらのエラーにより輻輳ウィンドウが急激に減少した後、回復と判断されると再度正常な状態に遷移し増加を始める。単位時間あたりに受信する確認応答の個数によって差はあるものの、輻輳ウィンドウの減少時に比べると緩やかに増加していくため、TCP 輻輳ウィンドウ制御において、輻輳ウィンドウの時間変化は鋸型となる。また、Linux の TCP 実装では、通信中にひとたび設定された輻輳ウィンドウは、その値を使い切らない限りは変化せず、その間のスループットはほ

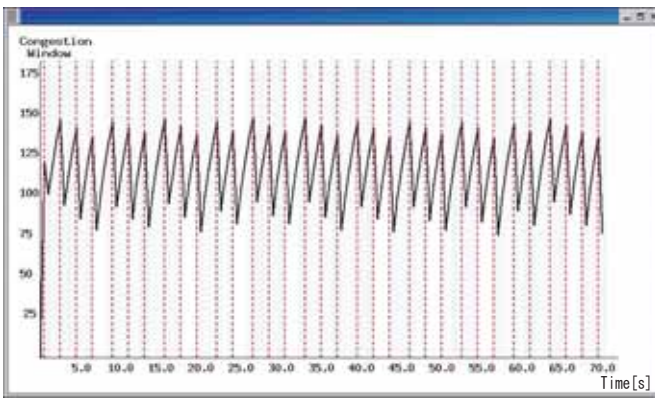


図 2: 有線 LAN 通信時の輻輳ウィンドウ個数の遷移

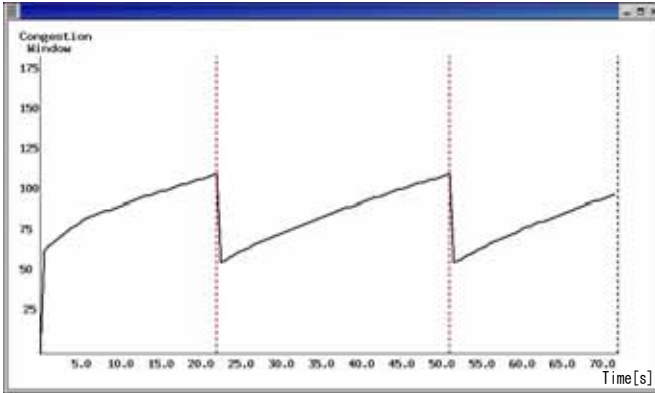


図 3: 無線 LAN 通信時の輻輳ウィンドウ個数の遷移

ば一定の値で安定する，ということが分かっている。

4 基礎実験と考察

実験システムとして，2 台の PC を Fast Ethernet 有線 LAN と IEEE802.11b 無線 LAN で接続したものをを用いた．各マシンのスペックは，CPU が Pentium III 800MHz，メインメモリが 640MB，OS が Linux 2.4.18-3 である．データ送信，スループットの測定には netperf を用いた [4]．スループットは有線 LAN 通信時には平均 93～94Mbps/sec，無線 LAN 通信時には平均 3～4Mbps/sec 程度の値が出ている．有線 LAN 通信時および無線 LAN 通信時のデータ送信側の輻輳ウィンドウの時間変化をそれぞれ図 2 と図 3 に示す．

図に示されている縦の点線は，Local Congestion エラーを検出したことを表している．

実験結果より，有線 LAN では短い周期の鋸状の波形となり，無線 LAN では長い周期の鋸状の波形となることが分かった．これは無線 LAN の時間単位あたりの送信パケット数が有線 LAN と比較して少なく，従って受信 ACK 数も少ないためであると考えられる．この結果より，無線 LAN においては，ひとたび輻輳ウィンドウの値が減少してしまうと元の値に戻るまでに長い時間がかかり，その間通信効率が大幅に低くなること分かる．従って Local Congestion エラーが起きない程度の高い値に

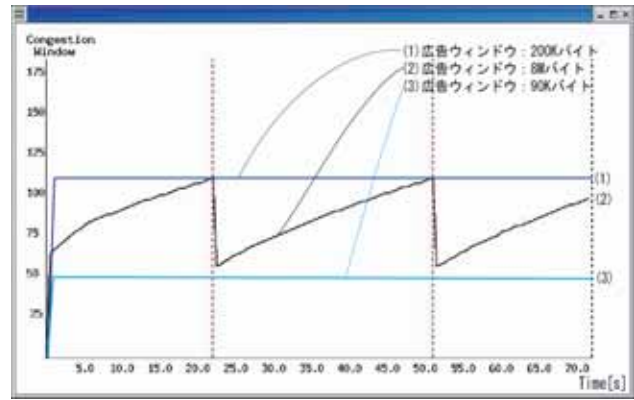


図 4: 輻輳ウィンドウ制御結果

輻輳ウィンドウを保つことが，無線環境で効率よく通信を行うためには重要であると考えられる．

5 輻輳ウィンドウ制御と通信効率向上

5.1 輻輳ウィンドウ制御

無線 LAN 通信において広告ウィンドウサイズを変更し，輻輳ウィンドウを制御する手法を検討した．広告ウィンドウとは受信側が送信側に指定するウィンドウサイズであり，輻輳ウィンドウと広告ウィンドウの小さい方が ACK 無しに連続送信できる最大パケット数となる．従って，広告ウィンドウが十分に大きい場合には，輻輳ウィンドウは広告ウィンドウに影響されることなく，そのネットワークにおける輻輳ウィンドウの最大値を取った後，Local Congestion などのエラーにより急激に値を下げる．広告ウィンドウが小さい場合には，最大値になる前に広告ウィンドウに成長を止められ，その値を保つ．

5.2 制御結果

実験システムを用いて制御を行った結果を図 4 に示す．広告ウィンドウが 8M バイトのときは，広告ウィンドウサイズが十分に大きく，輻輳ウィンドウの値は広告ウィンドウに影響を受けず，鋸型の波形を示す．広告ウィンドウをその値から徐々に下げていき，200K バイトにすると，輻輳ウィンドウの値が急激に落ちる直前に広告ウィンドウによって成長が止められ，輻輳ウィンドウが使い切られないため，そのときの値が保たれた．広告ウィンドウを更に下げていくと，輻輳ウィンドウは一定の値を保つが，広告ウィンドウの値の低下に伴い限界値が下がる（図 4 の広告ウィンドウ：90 K バイト）．

このことから本実験環境においては，広告ウィンドウのサイズを 200K バイトにした際，最も通信効率が向上すると言える．しかしスループットを測定したところ，広告ウィンドウサイズが 8 M バイトの時は 3.88Mbps/sec，200K バイトにした時は 3.94Mbps/sec と，スループットにはあまり大きな変化が現れなかった．

6 転送タイミングの解析

スループットに差が生じなかった原因として、隣接した二台の端末間という往復遅延時間が短い環境で無線 LAN 通信を行ったからという理由が予想される。すなわち遅延時間が短い時には、すぐに ACK が戻ってくるためウィンドウサイズの大小に関係なく輻輳ウィンドウの制限によるパケット転送の待ち状態がほとんど生じず、制御を行ってもスループットに差が出ない可能性が考えられる。そこで、tcpdump コマンド [5] を用いてパケットをキャプチャし更にそれらをグラフとして可視化することで、上記の予想の検証を行う [2]。

まず有線 LAN、無線 LAN 通信時の TCP パケットをキャプチャした結果を図 5、図 6 に示す。無線 LAN 通信では有線 LAN 通信に比べ、単位時間あたりにやりとりされるパケット数が圧倒的に少ないことが分かる。

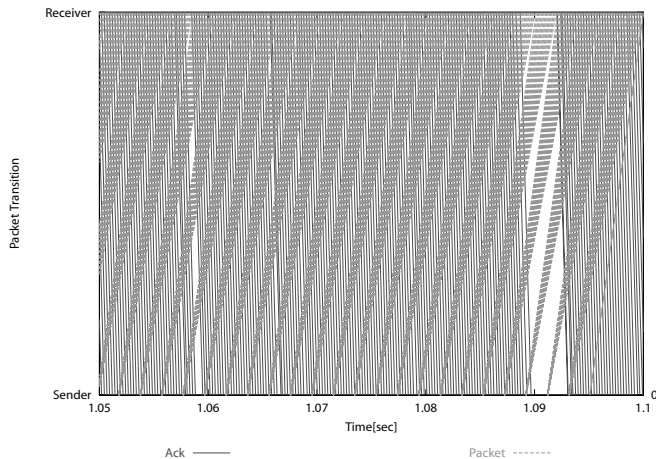


図 5: 有線 LAN 通信時の TCP パケット可視化図

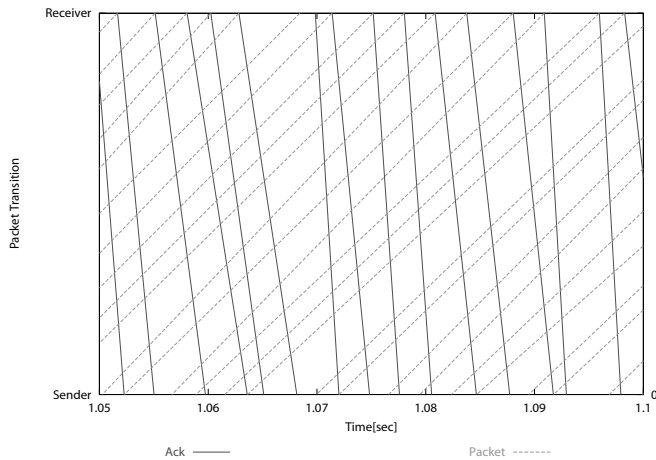


図 6: 無線 LAN 通信時の TCP パケット可視化図

次に、前節で述べたように、広告ウィンドウの値を変えて輻輳ウィンドウを制御した場合としなかった場合の TCP パケットの往来を可視化したものを図 7、図 8 に示す。図からわかるように、制御した場合、しなかった場合ともに、ACK が立て続けに返ってきておりパケットもスムーズにやりとりされている。このことから、先に立てた予想は正しいものと確認された。

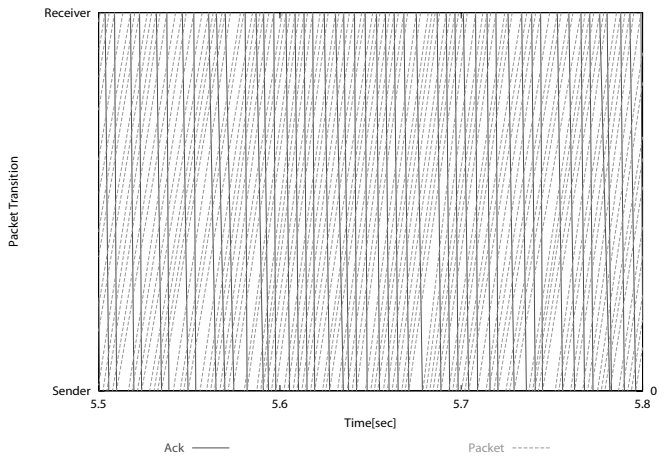


図 7: 輻輳ウィンドウ非制御時の TCP パケット可視化図

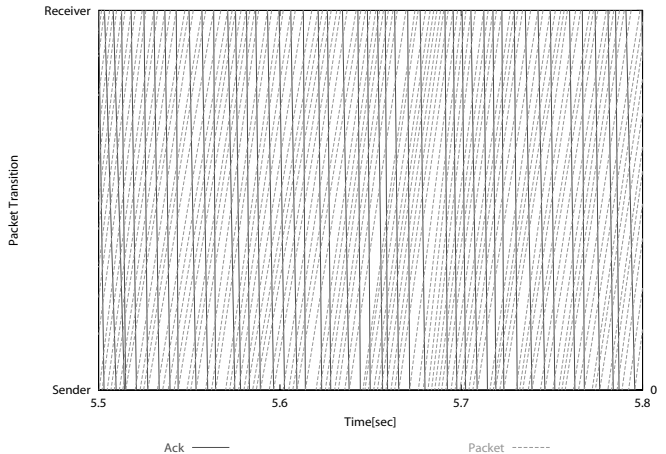


図 8: 輻輳ウィンドウ制御時の TCP パケット可視化図

7 遅延環境下での輻輳ウィンドウ制御

7.1 高遅延環境

そこで次に、往復遅延時間が大きな環境では輻輳ウィンドウがどのような振舞を見せるか解析する。図 9 のように、端末同士間にルーティングを行うノードを挟み、更に dummynet を用いて人工的に遅延を生じさせた環境で通信を行う [7]。図 9 のような環境は無線 LAN アクセスポイントからインターネットにアクセスする際の典型的なネットワーク構成である。Mobile host から Base station を挟んで固定ホストへとつなぐ通信において、エンドツーエンドの TCP 制御を行う必要があることが分かっている [3]。

7.2 遅延環境下での輻輳ウィンドウ制御

dummynet で片道遅延を 72msec、広告ウィンドウサイズ 8M バイトに設定した際の送信側ノードにおける輻輳ウィンドウの個数の時間遷移グラフを図 10 に示す。広告ウィンドウサイズが充分大きい場合、輻輳ウィンドウの個数の時間遷移は鋸型を示す。図 3 と比べ、大幅な往復遅延が存在するため ACK の返りが

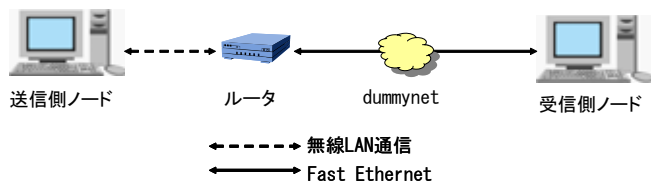


図 9: 高遅延環境

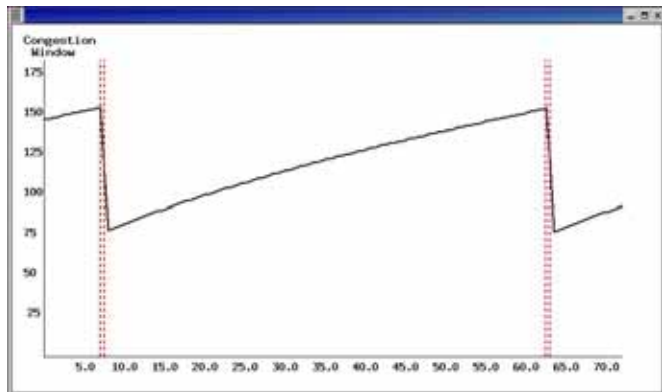


図 10: 高遅延環境下における無線 LAN 通信時の輻輳ウィンドウ個数の遷移

遅れ, それにより輻輳ウィンドウの個数の増加の割合が緩やかになっている。また、送信ペースがゆっくりであるため、Local Congestion エラーの出るペースもゆっくりとなり、輻輳ウィンドウの個数は図 3 の場合と比べより大きな最大値を取る。

次に 5 節で行ったように、広告ウィンドウのサイズを 8M バイトから下げて行き、輻輳ウィンドウがその値を使い切る直前に広告ウィンドウの値によって成長が止められ、一定値を取るようにした (図 11)。高遅延環境下では、ACK の戻りが遅いため、輻輳ウィンドウの個数の増加がゆっくりであり、ひとたび輻輳ウィンドウの個数が減少してしまうと、元に戻るのに更に長い時間がかかりその間に通信効率が低くなってしまふものと考えられる。従って、大幅な遅延が生じるような環境でこのような制御を行うことは有効であると言える。

一方スループットを測定してみると、制御した場合 3.84Mbits/sec, 制御しなかった場合 3.81Mbits/sec と、制御した場合と制御しなかった場合を比べてもスループットの値にあまり大きな違いは見られなかった。5 節の結果と比較しても、遅延がの大小で輻輳ウィンドウの振舞 (周期や値) に差は見られたが、本制御によるスループットにおける効果はあまり大きくはなかった。これは、本実験で用いている無線 LAN IEEE11b の帯域幅の狭さによるものと考えられる。

8 まとめと今後の課題

本研究では TCP パケットの振舞を可視化し、有線 LAN・無線 LAN 通信における TCP パケットの振舞を比較した。そこか

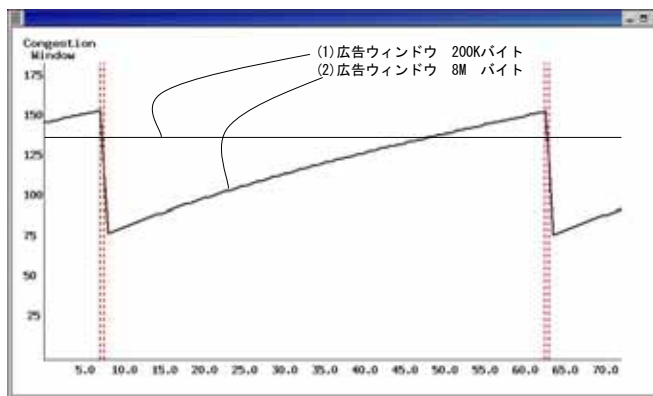


図 11: 高遅延環境下における輻輳ウィンドウ制御結果

ら無線 LAN 通信独自の問題点を発見し、広告ウィンドウサイズを変えることで輻輳ウィンドウを制御し通信効率を上げた。輻輳ウィンドウの制御はうまくいったもののスループットに著しい違いが生じなかったため、パケットのやりとりをキャプチャし比較することでその理由を検証した。それにより、隣接した往復遅延の短い環境の下、ACK がすぐに戻ってきてパケット転送の待ち時間が無いことが分かった。そこで、往復遅延時間を長くした環境の下で輻輳ウィンドウ制御を行ってみたが、スループットに大幅な向上は見られなかった。これは何より無線 LAN の通信帯域の幅の狭さによるものと考えられる。今後は、TCP/IP 実装を詳細に解読し TCP パラメータの解析等を更に進め、無線 LAN における通信効率が向上するよう制御を行って行きたい。

参考文献

- [1] 豊田 真智子, 山口 実靖, 小口 正人: "高遅延ネットワーク環境における iSCSI リードアクセス時の TCP 輻輳ウィンドウ制御手法の性能評価", 先進的計算基盤システムシンポジウム (SACSIS 2005) 論文集, pp.443-450, つくば, 2005 年 5 月
- [2] K. Kamisaka, S. Yamaguchi, M. Oguchi.: Performance Analysis of iSCSI Middleware Optimized for Encryption Processing in a Long-Latency Environment, Proc. The IEEE 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2006), Vienna, Austria, pp. 947-952
- [3] Ye Tian, Kai Xu, Nirwan Ansari: "TCP in Wireless Environments: problems and Solutions", IEEE Radio Communications, Vol.2, No.1, pp.s27-s32, March 2005
- [4] netperf: <http://www.netperf.org/>
- [5] tcpdump: <http://www.tcpdump.org/>
- [6] 松井 愛子, 豊田 真智子, 小口 正人: "無線 LAN 通信における TCP パラメータの一解析", 第 68 回情報処理学会全国大会, 1S-9, 2006 年 3 月
- [7] L.Rizzo: "dumynet"
http://info.iet.unipi.it/~luigi/ip_dumynet/