

無線および有線環境を考慮した輻輳制御ミドルウェアにおける 輻輳ウィンドウ制御の一検討

松野 瑛南[†] 山口 実靖^{††} 神山 剛^{†††} 小口 正人[†]

[†] お茶の水女子大学 〒 112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

^{††} 工学院大学 〒 163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2

^{†††} 長崎大学 〒 852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14

E-mail: [†]ena@ogl.is.ocha.ac.jp, ^{††}oguchi@is.ocha.ac.jp, ^{†††}sane@cc.kogakuin.ac.jp, ^{†††}kami@nagasaki-u.ac.jp

あらまし 近年、5G 通信や WiFi6 など無線 LAN 環境の通信技術が発達し、大容量データ通信が気軽に使えるようになった。一方、有線環境は機器の取り替えが困難な事例が発生し、有線側のボトルネックの影響で輻輳が発生する。本研究では、通信性能の異なる複数端末に先行研究の輻輳制御ミドルウェアを導入し、通信速度が異なる環境下でミドルウェアを導入していない場合と比較し向上しているか合計通信速度と公平性の指標から性能評価実験を行った。実験結果から、TCP チューニングしたところ端末の通信性能の違いによって公平性指標に問題が生じたため改良指標を提案し、提案指標の評価を行った。さらに、ネットワークの負荷を推定するために使用する RTT 値に注目し、先行研究のミドルウェアの手法を参考に RTT と輻輳ウィンドウの関係を調査するために TCP チューニングを行なった。チューニング結果から、公平性の向上が確認できたため、既存手法に改善を加え性能向上を実現する手法を提案する。

キーワード 無線規格、通信制御、Android

1 はじめに

近年、インターネットの普及に伴い、スマートフォンやパソコンなど無線環境で使用する端末の市場が拡大した。従来の携帯電話の使用法は、メールや電話のみだったが、スマートフォンが登場してから、端末が高性能になり、端末上でライブ配信の視聴、オンライン授業や会議の参加、データ保存などの大容量のデータ通信など様々な方法の使用が可能になった。

また、無線通信の高速化の技術も進歩している。現在、無線通信環境では、5G を代表とした公衆無線通信と、無線 LAN 通信の高速化が進んでいる。無線 LAN 通信は WiFi6 など通信の高速化に向けて新しい規格が出ている。公衆無線通信では、5G という第 5 世代移動通信システムがあり、高速大容量、高信頼・低遅延通信、多数同時接続の主に三つの軸がある。このような技術の進歩により、快適に通信ができる環境になった。しかし、これらの通信は全て無線環境で行われるため、ネットワークトラフィック量が急激に増加している。この急増に加えて、通信が集中するとネットワークが混雑し、最悪の場合通信できなくなる、つまり、輻輳が発生する。

本研究では、輻輳を回避するためのシステムとして先行研究の輻輳制御ミドルウェアを使用した [1] [2] [3]。このミドルウェアは、Android 端末間の連携した制御を行うことで、公平性と合計通信速度の向上を目的としている。このシステムは、同一のアクセスポイント (AP) に接続した Android 端末間を連携し、各端末の接続状況を把握することで、輻輳ウィンドウ (CWND) を算出する。算出結果から補正を行うことで端末間の可用帯域を公平に分け合う。これにより、合計通信速度と公

平性の向上を可能にしている。

現在の通信環境は、無線環境、有線環境ともに帯域が広がり通信速度が向上している。無線環境は、先述したように WiFi6 や 5G サービスなど通信帯域が広がった。しかし、スマートフォンなど日常的に使用する端末の通信量の増加により無線通信側で輻輳が発生するために、無線側のボトルネックの影響で発生する輻輳を回避するための制御が必要になる。

また、有線環境側では無線側に比べ、機器の交換頻度が少なく、取り替えが困難である事例が発生している。この事例に加えて、無線通信の高速化が進むと、有線環境よりも無線環境の方が通信速度が速くなり、有線側のボトルネックの影響で輻輳が発生する。先行研究の輻輳制御ミドルウェアは、この事例の制御を考慮していない。また、Android OS も更新されており、最新の試験環境や、最新の端末に輻輳制御ミドルウェアを導入した場合正常に動作しているか確認する必要がある。

以上のことから、本研究では、無線側、有線側の両方がボトルネックとなって輻輳発生する場合に制御するシステムの構築を目標としている。本稿では、有線環境の通信速度が異なる環境を構築し、複数の Android 端末の同時通信を行い、先行研究のミドルウェアの性能評価実験を行った。実験結果から、公平性の指標に問題が発生したため、TCP チューニングを行い、公平性の改良版指標を提案、評価を行った。さらに、改良版指標で評価を行った際に、本研究の 100Mbps 環境では先行研究の輻輳制御ミドルウェアの制御手法では効果が現れないという問題が発生した。そこで、TCP BBR の手法を参考に RTT と CWND の関係性を調査し、合計通信速度と公平性が向上する手法を提案する。

2 関連研究

2.1 カーネルモニタ

通常、カーネル内部の処理は、バックグラウンドで処理されるため監視することができない。そこで先行研究 [4] でカーネルモニタというシステムが開発された。これは、TCP ソースコードにモニタ関数を挿入しカーネルで再コンパイルすることで、TCP パラメータをモニタ可能にするシステムである。このシステムを組み込み機器である Android 端末上で実装することで、TCP 通信におけるカーネル内部の処理をユーザ空間からリアルタイムにモニタや解析し、TCP パラメータの値の変化を記録することが可能となる。

2.2 輻輳制御ミドルウェア

先行研究で開発された輻輳制御ミドルウェア [1] [2] [3] は、カーネルモニタをベースとしたシステムである。同一のアクセスポイント (AP) に接続した Android 端末間を連携し、各端末の接続状況を把握することで、合計通信速度の高速化と公平性の向上を可能にする。具体的には、各端末の通信状況や RTT を計測する。その情報から利用可能な帯域幅を計算し、帯域幅を上回るパケットを送信するのを防ぐために CWND の上限値を自動で算出、補正する。これにより、端末間で可用帯域を公平に分け合い、無線 LAN AP における ACK パケットの蓄積を回避する。

本研究はカーネルモニタで得ることができる情報を用いて、無線 LAN AP に接続される端末において輻輳を回避するために制御を行うことを目標としている点で関連研究を継承している。しかし、先に述べたように、現在無線環境の高速化に伴い通信環境が変化している。先行研究と現在の通信環境の違いは主に二つある。一つ目は、端末がより高性能になったことにより、ヘテロな環境が発生したことである。二つ目は、輻輳の発生原因が増えたことにより、無線側と有線側の両方がボトルネックになる可能性があるため、有線側の影響で発生する輻輳の制御を考慮することである。本稿では、本実験環境下で正常に動作するか調査を行った。そして、調査結果から公平性と合計通信速度の二つの指標が向上するような改良を行う。

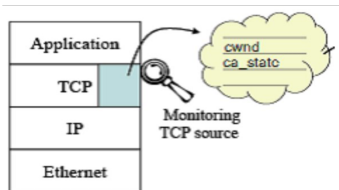


図 1 カーネルモニタ

2.3 スマートフォンにおける輻輳制御

Android OS はカーネルに Linux カーネルを用いており、輻輳制御アルゴリズムに CUBIC TCP [5] を用いている。また、近年は新しい TCP 輻輳制御アルゴリズムとして TCP BBR [6] が提案され今後の普及が期待されている。ただし、CUBIC TCP

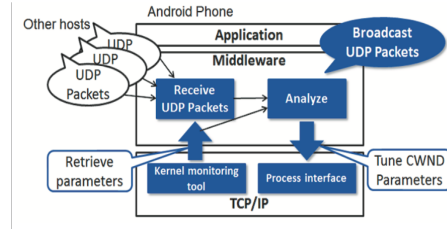


図 2 輻輳制御ミドルウェア

と TCP BBR が共存して通信を行った場合は両 TCP の通信速度の公平性が低くなることが示されており [7] [8] [9]、今後は複数種類の輻輳制御手法や端末が混在する環境における性能の公正性の考察が重要であると考えられる。特にモバイル環境における不公平性 [10] が示されており、スマートフォン端末などにおける性能公平性の改善が重要であると考えられる。

2.4 TCP 公平性

TCP 輻輳制御アルゴリズム間の公平性の評価が行われており、アルゴリズム間の公平性が低くなることが示されている [7] [8] [9] [11] [12]。しかし、これらの研究は端末間での協調を行わない従来環境のみを想定しており、これらの研究で考察されている公平性改善の効果も限定的となっている。一方で本稿では、ミドルウェアを用いて端末が協調動作を行い、また事前調査を行うなどのより発展したものとなっており、その効果も大きいものとなっている。

2.5 TCP BBR

TCP BBR は、2016 年、Google 社によって BBR (Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time) [13] というアルゴリズムが考案された。Google Cloud Platform (GCP) 等で使用されるなど TCP BBR が注目を集めている (図 3)。このアルゴリズムは、ネットワークの使用可能帯域を全部使用し、バッファ遅延を発生させない環境を作るために開発された。直接経路上のネットワーク機器の状況を把握できないため、スループットと RTT を常に監視しデータ送出量と RTT の関係を把握する。それを踏まえて、データの送信速度を調節することで、ネットワークが処理可能な範囲内を見極めることができ、通信環境下で最大スループットを出して通信することが可能になる。

3 端末の通信性能評価

3.1 実験概要

本稿では、先行研究の輻輳制御ミドルウェアが本実験環境で正常に動作するか評価を行う。具体的には、4 台の Android 端末とサーバ間で Iperf [14] を用いた同時通信を行う。そして、合計通信速度と公平性を測定し輻輳制御ミドルウェアの制御がある場合とない場合の比較を行う。

公平性を評価する評価指標として、Jain の Fairness Index [15] を使用した。次式で定義されており、 x は通信速度、 n は標本数である。

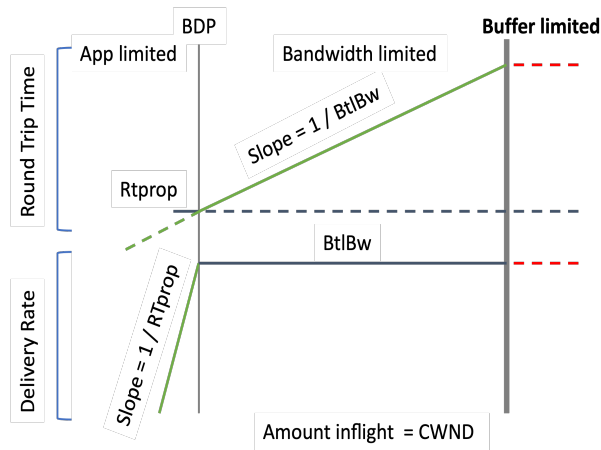


図 3 BBR の概要

$$f = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} (1 \leq i \leq n)$$

3.2 実験環境

表 1 に実験に使用した機器の性能を、図 4 に本研究で構築した実験環境を示す。Android 端末と AP 間は無線接続環境、AP とサーバ間は有線接続環境である。また、AP とサーバ間に転送速度 100Mbps のスイッチングハブを設置し、1Gbps 環境と 100Mbps 環境の通信速度が異なる環境を構築した。本研究では、クライアントとしてスマートフォン 2 台、タブレット 2 台、サーバとして Ubuntu を実験に用いた。本稿では、Pixel4 はスマートフォン 1、Pixel5 はスマートフォン 2、Nexus7 の 2 台のタブレット 1、2 と記す。

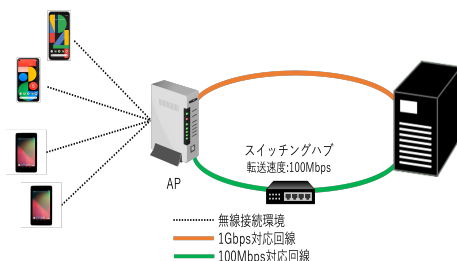


図 4 実験環境

表 1 実験機器の性能

Android	Model number	Pixel4	Pixel5	Nexus 7(2013)
	OS	Android 10	Android 11	Android6
	CPU	Snapdragon 855	Snapdragon 765G	Snapdragon S4 Pro
	Memory	6 GB	8 GB	2 GB
	WLAN	Wi-Fi 802.11 a/b/g/n/ac	Wi-Fi 802.11 a/b/g/n/ac	Wi-Fi 802.11 a/b/g/n
Server	OS	Ubuntu 20.04 LTS		
	CPU	Intel(R)Core(TM) i7-10400		
	Main Memory	32GB		
AP	Model	WSR-2533DHP2		
	Support Format	IEEE 802.11a/b/g/n/ac		
	Frequency Band	5 GHz		

4 基礎実験

4.1 各端末の通信性能

基礎実験として、本実験で使用する端末の通信性能を計測した。図 5 は有線環境 100Mbps の通信性能、図 6 は有線環境 1Gbps の通信性能を示す。スマートフォン 2 台とタブレットは、無線規格、Android OS が異なるため、有線環境 100Mbps、1Gbps でスループットの値が大幅に異なっていた。

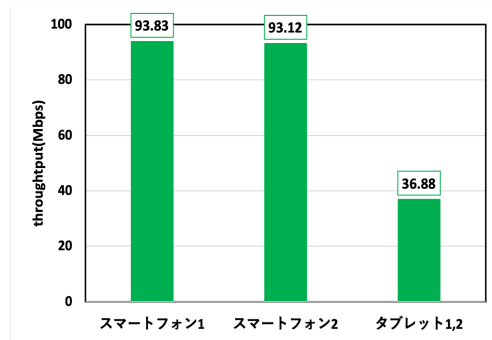


図 5 有線環境 100Mbps

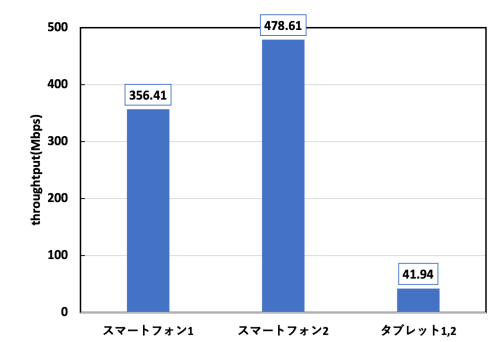


図 6 有線環境 1Gbps

4.2 輻輳制御ミドルウェアの性能評価

有線環境 100Mbps でのスループットを図 7 に、合計通信速度と公平性を図 8 に示す。図 8 より、デフォルト通信時より輻輳制御ミドルウェアを導入した場合に、二つの指標が向上した。このことから、100Mbps 環境では輻輳制御ミドルウェアが有効に動作していることが確認できた。

有線環境 1Gbps でのスループットを図 9 に、合計通信速度と公平性を図 10 に示す。図 10 より、デフォルト通信時と輻輳制御ミドルウェア導入時の点がほぼ同じ位置にある。このことから、1Gbps 環境では輻輳制御ミドルウェアが有効に動作していないことがわかった。

以上のことから 1Gbps 環境でも輻輳制御ミドルウェアによる制御が有効に動作するように、各評価指標を重視する TCP チューニングを行い、合計通信速度と公平性の観点で評価を行った。

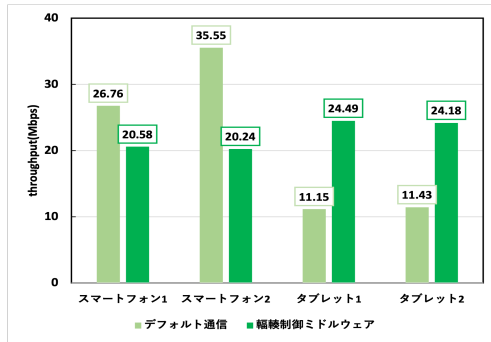


図 7 有線環境 100Mbps スループット

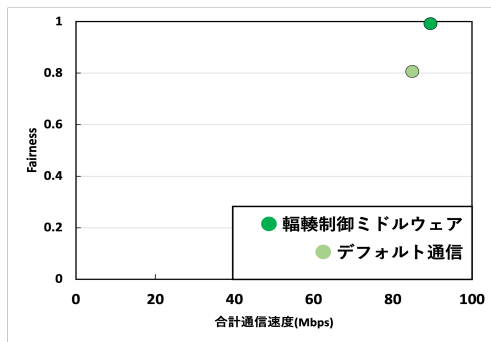


図 8 有線環境 100Mbps 合計通信速度と公平性

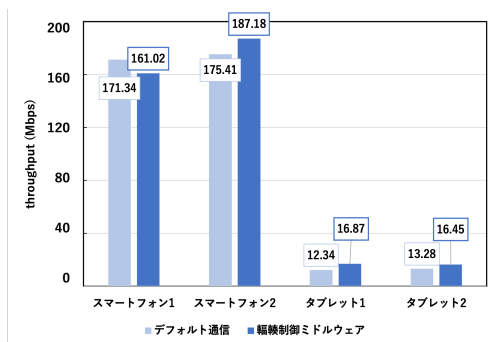


図 9 有線環境 1Gbps スループット

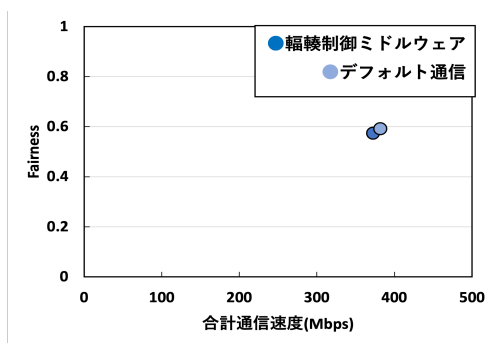


図 10 有線環境 1Gbps 合計通信速度と公平性

4.3 TCP チューニング

4.3.1 公平性重視

公平性を向上させるために、通信性能の高い端末の CWND を下げ、通信性能の低い端末が帯域をより広く使えるような制御を行う。本節では、スマートフォン二台の CWND を変更し

た。本実験の有線環境は、1Gbps 環境である。図 11 は、図 10 と同様に合計通信速度と公平性を散布図で評価した。色によって、デフォルト通信、先行研究のミドルウェア、輻輳ウィンドウ変更を区別する。またマークによって、CWND の値 100, 500, 1000, 1500 を区別する。

CWND を減少すると、緑の点は徐々に左上に移動し、公平性は向上した結果となった。しかし、実験環境は 1Gbps であるが、合計通信速度が 300Mbps 以下と使用可能な帯域のうち半分にも満たない制御になった。

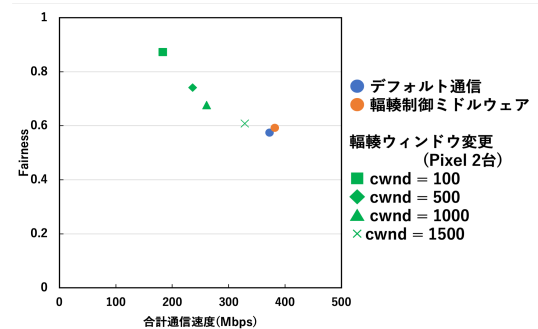


図 11 公平性重視 (有線環境 1Gbps)

4.3.2 合計通信速度重視

本実験環境で合計通信速度を高めるための制御手法として、通信性能の高い端末のスループットを上げた。最大スループット (図 6) と取得したスループット値 (図 9) を比較し、スマートフォンの値の差が大きいため、タブレットの CWND の値を下げることで、スマートフォンのスループットが向上し、合計通信速度が高くなると予測した。タブレット二台の CWND の値を三段階で変更させ、前章と同様の実験を行った。本実験の有線環境は、1Gbps 環境である。図 12 は、図 10 と同様に通信速度と公平性を散布図で評価した。縦軸が公平性 (Fairness Index)、横軸が合計通信速度 (Mbps) を示す。また、青い点はデフォルト通信を行った結果、オレンジの点は先行研究のミドルウェアを用いた結果、緑の点は TCP チューニング変更を行った結果を示す。またマークによって、CWND の値 10, 50, 100 を区別する。結果として、CWND を低くするとスマートフォンのスループットが速くなり、合計通信速度が向上した。

以上のことから、両指標とも、重視した指標の値はそれぞれ高くなっていますが、もう一つの指標は低くなっている、パレート最適になっていることが確認できた。しかし、縦軸の公平性の値が低く、良い制御とはいえず、より良い制御を行うためには前節の公平性も考慮する必要がある。

5 改良版 Fairness Index

5.1 既存公平性指標の問題点

本研究では、スループットが異なる端末が混在する環境において、端末ごとに最適な通信速度を取得し、合計通信速度と公平性の向上を目標としている。既存の公平性指標は、本実験環境で使用する場合に問題点が発生した。前提として、図 6 から、

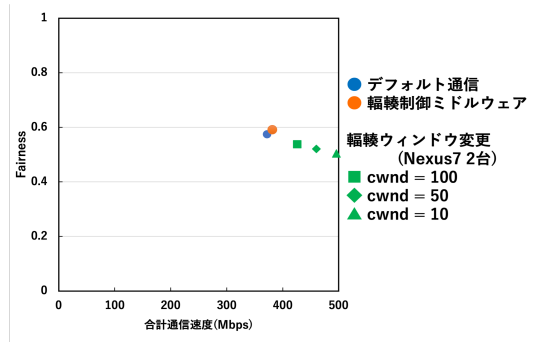


図 12 合計通信速度重視 (有線環境 1Gbps)

端末ごとに最大通信速度が異なる．そのため，本実験環境で同時通信した場合に同等のスループット値にならないのは明白である．以上のことから，本実験環境のような複数種類の端末の混在環境において既存指標が適さないため，公平性指標を再定義し直す必要がある．そこで，本研究では混在環境においても適応する指標を提案する．

5.2 改良版 Fairness Index の提案

既存の公平性指標の式のうち取得した通信速度ではなく，取得した通信速度を最大通信速度の値で割った値を代入することで，通信性能に重みをつけた指標を提案する．各端末の最大通信速度の値は図 5, 6 を使用した．Max を各端末の最大通信速度とした場合，改良版の Fairness Index は下記の式のようになる．

$$f = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{Max_i} \right)^2}{n \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{Max_i}^2} (1 \leq i \leq n)$$

5.3 評価実験

5.3.1 100Mbps 環境

改良版 Fairness Index の評価を行うため，図 7 の実験結果を用いた．図 13 は，合計通信速度と公平性の散布図で実験結果を評価する．また，薄緑色の点は既存指標，緑の点は改良版指標を用いた結果を示す．

100Mbps 環境は，先行研究のミドルウェアを導入した場合，改良版 Fairness Index の値よりも既存指標の Fairness Index の方が値が高くなった．このことから，100Mbps 環境は改良版 Fairness Index の観点から，先行研究のミドルウェアは良い制御手法でないことが示された．そこで次節で，改良版 Fairness Index と合計通信速度の二つの指標が向上するような手法の提案を行う．

5.3.2 1Gbps 環境

改良版 Fairness Index の評価を行うため，図 9 の実験結果を用いた．図 14 は，合計通信速度と公平性の散布図で，実験結果の評価を行なった．縦軸が公平性 (Fairness Index)，横軸が合計通信速度 (Mbps) を示す．また，薄青色の点は既存指標，青色の点は改良版指標を用いた結果を示す．

図 14 から，既存指標の Fairness Index はグラフの中央に分布している．一方で，改良版 Fairness Index は，既存指標のグ

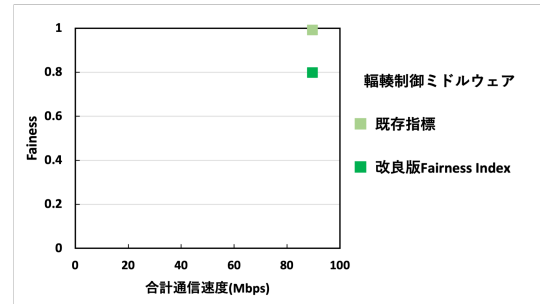


図 13 改良版 Fairness Index の公平性と合計通信速度の散布図 (100Mbps 環境)

ラフの真上に位置しており，既存指標と比較し非常に高い公平性を表している．これは，通信性能を考慮した改良版 Fairness Index を使用することで，公平性が向上したことにより適切に公平性を評価できたと考えることができる．

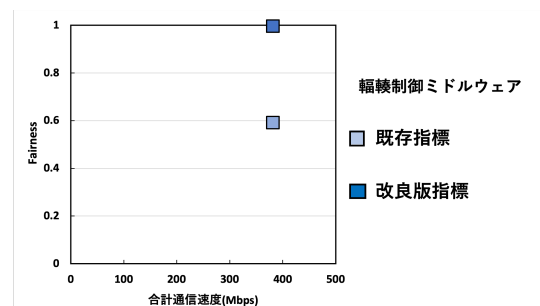


図 14 改良版 Fairness Index の公平性と合計通信速度の散布図 (1Gbps 環境)

6 輻輳制御ミドルウェアの提案手法 (100Mbps 環境)

6.1 先行研究ミドルウェアの問題点

本研究では，通信性能の異なる端末を同時通信した際の混在環境下で，提案した改良版の公平性指標と合計通信速度が向上するような制御を目指している．しかし 5.3.1 節より，100Mbps 環境下で改良版指標で公平性を評価した場合，公平性が低くなった．これは，既存システムでは全端末の CWND が同じ値になることを前提として制御がされているため，図 7 より，輻輳制御ミドルウェア導入時の各端末のスループットはほぼ同じ値になったことによる．具体的には，端末の CWND 値の合計とサーバと端末間の RTT 値の相関関係を調査し，パケットがキューに収まっている CWND 値の合計を基準とし，同時接続端末数で分け合うことで，CWND を補正する手法である．以前の環境では有効な制御だったが，本実験環境下では公平性が低くなる制御となった．そこで，輻輳制御ミドルウェアの制御手法 [3] である，TCP BBR の手法を参考に TCP チューニングを行った．

6.2 TCP チューニング

RTT 値と CWND 値の相関関係を調査するために，TCP

チューニングを行った。本稿では、TCP 輻輳制御アルゴリズムそのものに改変を加えるのではなく、TCP チューニングで 100Mbps 環境下での最適な CWND 値を算出し、その値をアルゴリズムが導入されている端末に上書きすることで制御を行う。

チューニングを行う上で、通信性能が異なると取得する CWND も異なるため、基準値を設定し、その値を基に CWND を変化させた。ミドルウェアの輻輳制御アルゴリズムは、CWND 値の上限値と下限値を設定しているため、上限値を 2 倍から 64 倍まで変化させた時の RTT 値を観察した。この時、下限値は上限値の倍率から 1 引いた倍率である。基準値は、図 13 で一番改良版指標の値が高いデフォルト通信時の CWND 値とした。そして、設定した CWND でデータ送信を行い、その時の RTT 値の変化を観察した。得られた 2 つの指標の関係から最も合計通信速度と公平性が高いと期待される値に CWND を設定する。

図 15,16,17,18 は、4 台の端末の CWND 値とサーバと端末間の RTT 値の相関関係を示した。この図より、CWND と RTT 値の関係から 100Mbps 環境下で最適な倍率の値を調査する。図 3 の様に、高いスループットを得て、パケットがキューから溢れないようにするには Bandwidth limited の領域まで inflight 量 (すなわち CWND) を増やす必要があり、Buffer limited を超えないことが重要となる。具体的には、CWND 値を増加していく際に、RTT 値が比例的に上昇する場合はキューが溢れておらず、RTT 値が一定または微小の増減をしている場合にはキューが溢れている事が示されている。本稿では、実験結果の図 15,16,17,18 から Buffer limited 点を線形近似を使用して見つけたプログラムを作成し、その点を算出した。

自動探索プログラムを実行した結果を表 2 に示す。この表から、RTT 値と CWND の値を調査した結果各端末に一番最適な CWND の値が判明した。次節では、本節で求めた CWND 値を端末に導入し、合計通信速度と公平性の観点から評価を行った。

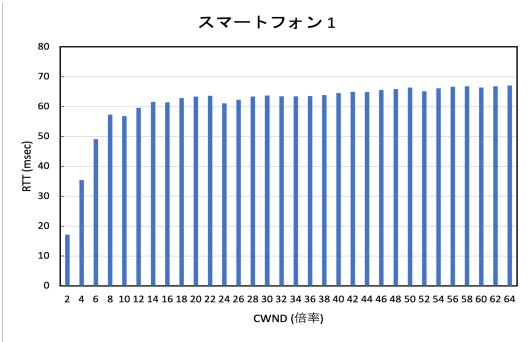


図 15 CWND 値と RTT 値の相関関係: スマートフォン 1

6.3 評価結果

今回も合計通信速度と公平性の両方に着目するために、散布図で評価を行う。図 19 に各端末のスループットを、図 20 に散布図を示す。散布図の縦軸は公平性 (Fairness Index)、横軸は

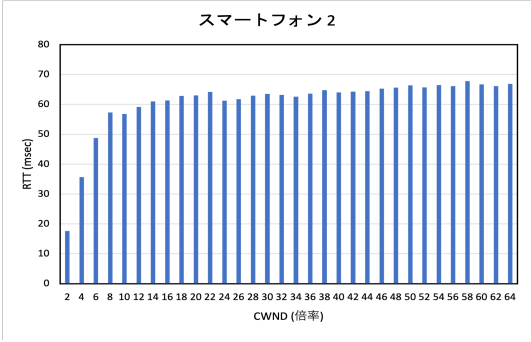


図 16 CWND 値と RTT 値の相関関係: スマートフォン 2

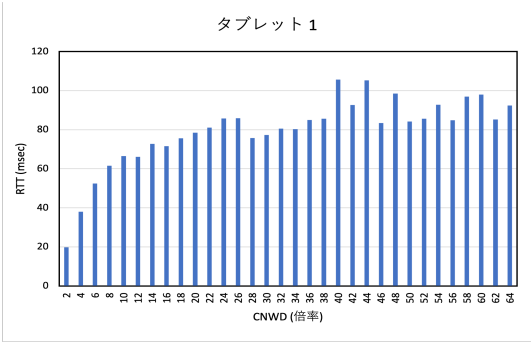


図 17 CWND 値と RTT 値の相関関係: タブレット 1

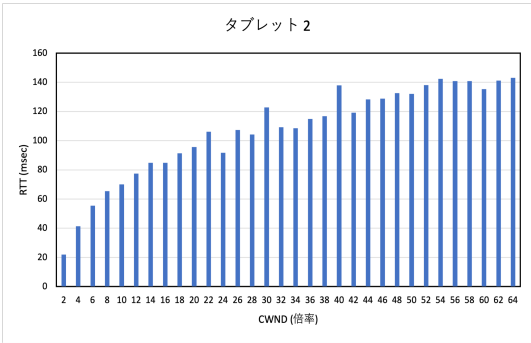


図 18 CWND 値と RTT 値の相関関係: タブレット 2

表 2 各端末の最適な CWND 値の倍率	
端末名	Buffer limited 点 (最適倍率)
スマートフォン 1	8 倍
スマートフォン 2	8 倍
タブレット 1	10 倍
タブレット 2	14 倍

合計通信速度 (Mbps) を示す。薄緑の点はデフォルト通信、緑の点は先行研究のミドルウェアを用いた結果、深緑の点は本提案プログラムで求めた倍率を用いた結果を示す。図 20 から、本提案プログラムで求めた倍率を導入した結果が公平性、合計通信速度共に最も高い値に向上した。

7 まとめと今後の予定

本研究では、輻輳の発生原因が無線側、有線側それぞれである事例の環境下で合計通信速度と公平性の二つの指標が高くなるように制御するシステムの構築を目的とし、有線環境の通信

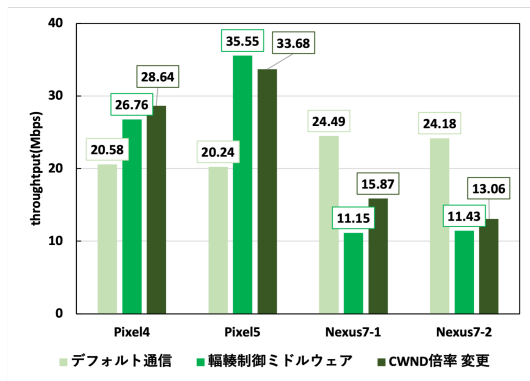


図 19 100Mbps 環境 スループット値

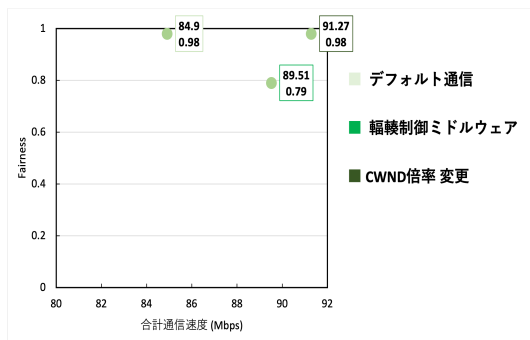


図 20 100Mbps 環境 公平性と合計通信速度の評価

速度が異なる環境を構築し、iperf 通信の同時実験を行った。具体的には、先行研究のミドルウェアが本実験環境では有効に動作するか調査するために、Android 端末 4 台をクライアントとしサーバ間の同時通信を行なった。

有線環境が 100Mbps 環境下では、デフォルト通信時と比較し合計通信速度、公平性が向上していたことから、ミドルウェアが正常に動作していた。しかし、有線環境が 1Gbps 環境下では、両指標ともデフォルト通信時とほぼ変化なかった。その結果、1Gbps 環境下ではミドルウェアの制御の効果がなかったことがわかった。ミドルウェアが 1Gbps 環境下でも正常に動作するために TCP チューニングを行なった。チューニングを行なった結果、両指標の関係がパレート最適であることが判明し、また、既存の公平性指標に問題が発生したため、改良版指標の提案、評価を行った。

改良版指標を用いて評価を行ったところ、100Mbps 環境での公平性が低くなり、1Gbps 環境下では公平性が高くなった。これは、先行研究の輻輳制御ミドルウェアの制御の影響であることがわかった。そのため、100Mbps 環境下で RTT と CWND の関係性を調査するためにチューニングを行なった。具体的には、自動チューニングプログラムを開発し、CWND 値の上限値と下限値を少しずつ変化させ、RTT 値を求めた。

チューニングを行なった結果、各端末において一番最適な CWND 値が判明した。スマートフォン 2 台は同じ値であったのに対し、タブレット 2 台の値は異なる結果となった。

今後の課題としては、改良版指標を用いて 100Mbps 環境、1Gbps 環境の公平性と合計通信速度の値を向上していきたい。

端末の種類や、数を増やした環境ではどのような効果が表れるか合計通信速度と公平性の観点から評価を行ってみたい。

謝 辞

本研究は一部、JST CREST JPMJCR22M2 の支援を受けたものである。

文 献

- [1] Hiromi Hirai, Saneyasu Yamaguchi, and Masato Oguchi. A Proposal on Cooperative Transmission Control Middleware on a Smartphone in a WLAN Environment. Proc. IEEE WiMob2013, pp. 710-717, October 2013.
- [2] Ai Hayakawa, Saneyasu Yamaguchi, and Masato Oguchi. Reducing the TCP ACK Packet Backlog at the WLAN Access Point. Proc. ACM IMCOM2015, 5-4, January 2015.
- [3] Ayumi Shimada, Masato Oguchi. A Study of Android Tables Performance. Proc. DEIM2017, H2-3, March 2017.
- [4] Kaori Miki, Saneyasu Yamaguchi, and Masato Oguchi. Kernel Monitor of Transport Layer Developed for Android Working on Mobile Phone Terminals. Proc. ICN2011, pp.297-302 January 2011.
- [5] Sangtae Ha, Injong Rhee, and Lisong Xu. Cubic: A new tcp-friendly high-speed tcp variant, July 2008.
- [6] Bbr: Congestion-based congestion control. ACM Queue, 14(5):50, 2016.
- [7] M. Hock, R. Bless, and M. Zitterbart. Experimental evaluation of bbr congestion control. In *2017 IEEE 25th International Conference on Network Protocols (ICNP)*, pages 1-10, 2017.
- [8] K. Miyazawa, K. Sasaki, N. Oda, and S. Yamaguchi. Cycle and divergence of performance on tcp bbr. In *2018 IEEE 7th International Conference on Cloud Networking (CloudNet)*, pages 1-6, 2018.
- [9] K. Sasaki, M. Hanai, K. Miyazawa, A. Kobayashi, N. Oda, and S. Yamaguchi. Tcp fairness among modern tcp congestion control algorithms including tcp bbr. In *2018 IEEE 7th International Conference on Cloud Networking (CloudNet)*, pages 1-4, 2018.
- [10] Jae Won Li, Fengand Chung, Xiaoxiao Jiang, and Mark Claypool. Tcp cubic versus bbr on the highway. In Robert Beverly, Georgios Smaragdakis, and Anja Feldmann, editors, *Passive and Active Measurement*, pages 269-280, Cham, 2018. Springer International Publishing.
- [11] D. Scholz, B. Jaeger, L. Schwaighofer, D. Raumer, F. Geyer, and G. Carle. Towards a deeper understanding of tcp bbr congestion control. In *2018 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops, 2018*, pages 1-9, 2018.
- [12] Y. Zhang, L. Cui, and F. P. Tso. Modest bbr: Enabling better fairness for bbr congestion control. In *018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 00646-00651, 2018.
- [13] Bbr: Congestion-based congestion control measuring bottleneck bandwidth and round-trip propagation time.
- [14] iperf. <https://iperf.fr/iperf-download.php>. Accessed: 2021-1.
- [15] D.-M. Chiu and R. Jain. Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks. *computer Networks and ISDN Systems*, vol. 17, pp. 1-14, 1989.