

ネットワーク状態予測を利用した Web アクセス制御方式

中島一彰^{†1} 西川由明^{†1} 川本亜紀子^{†1}

本稿では、インターネットや無線ネットワークなどネットワーク状態が大きく変動するネットワーク上で、ネットワーク変動予測の結果に基づいてデータ送信を行うことで、安定した Web アクセスを可能にする制御方式のフレームワークについて述べる。従来、Web アクセスを安定的に行う手法として、直近に計測したデータ通信のアクセス速度に基づいて、サーバから端末へ配信するコンテンツのデータサイズを変更するなどのフィードバック型の制御が行われていたが、ネットワークの利用可能帯域や通信遅延変動が大きく変動する場合には、制御が間に合わずに対応できなかった。そこで、ネットワーク状態予測に基づいて Web アクセス制御を実施する方式を提案する。Web アクセスするときのネットワークの利用可能帯域と通信遅延の変動を予測し、帯域の変動幅と遅延の変動幅の予測値の変化に応じて、Web ページの先行配信や複数セッションを用いた送信などの制御を切り替えることで、Web アクセスに対するネットワークの変動の影響を低減する。LTE で実測した通信データに基づきシミュレーションによる検証を実施し、ネットワーク状態予測を用いることで、フィードバック型の従来方式と比較して誤選択の確率が半減し、適切な Web アクセス制御が選択できることを示す。

The web access control system which used network status prediction

KAZUAKI NAKAJIMA^{†1} YOSHIKI NISHIKAWA^{†1}
AKIKO KAWAMOTO^{†1}

This paper describes a framework of the control system which enables stable web access based on the network status prediction on the internet and the radio network which fluctuates. In the past research, it is used the data size optimization of the web contents which are delivered to a terminal from a server based on access rate of the data communication which was measured nearest web access. But when an available bandwidth of the network and a communication delay fluctuation fluctuated big, it couldn't correspond. So We propose the system which puts web controlled accessibility into effect based on a network status prediction to reduce a fluctuation of a network for web access. The framework controls the preceding delivery of a Web page and a transmission using multi session access according to the change in predicted value of fluctuation range in a bandwidth and delayed fluctuation range. It was simulated based on observed communication data, and it was inspected to be able to cut occurrence of miss control by half compared with the feedback system.

1. はじめに

モバイルブロードバンド環境とスマートフォンの普及に伴い、これまで ADSL や FTTH などの有線ネットワークを利用していたユーザが、LTE、3G や公衆無線 LAN などの無線ネットワークを利用する機会が急速に増えている。外出先や移動中にスマートフォンやテザリングした PC からインターネットにアクセスして、Web ページを閲覧することが一般的になっている。しかし、これまで安定した有線ネットワークを利用していたユーザの多くは無線ネットワークの通信品質に不満を持っている。無線ネットワークは有線ネットワークと比較して、利用可能帯域や通信遅延の変動が激しい。LTE や 3G、無線 LAN で利用されている無線ネットワークの通信方式は、一定範囲の周波数帯域を多数の端末と共有しているため、ほかの端末のトラフィックの増減の影響を受けて、利用可能帯域が大きく変動することが多々ある。さらに、移動によって電界強度が変動し、電波ノイズの影響も受けて、パケットの遅延やロストが発生しやすい。この性質は、ネットワークの規格が進化して広帯域化しても同じであり、周波数拡散の電波帯域が広が

るので、変動は一層激しくなることが予測される。条件がよい場合は有線ネットワーク並みの通信速度がでる可能性があるが、多くのユーザが利用する時間帯や、繁華街など多くの人がいる場所では、利用可能帯域と通信遅延の変動が大きくなり、Web アクセスの速度が突発的に低下する。また、無線ネットワークの課金形態が定額制から従量制に移行しており、トラフィックの増加をできるだけ抑えることが求められている。したがって、Web アクセスの速度を改善する Web アクセス制御技術を常時実施して、データ通信量を増加させることは好ましくない。

我々は、これらの問題に対応するフレームワークとして通信状態の予測に基づいた Web アクセス制御を提案する。無線ネットワークの変化が激しくなると、直近のアクセスで計測した情報を元に制御するフィードバック制御では間に合わず、通信品質が低下する可能性がある。そこで、ネットワークの通信状態の変化として TCP スループット予測と通信遅延予測の情報を元に、Web アクセスに関して冗長送信や先行配信のフィードフォワード制御を行うことで、ネットワークの負荷を抑えて安定した Web アクセスを可能にする。

文献[1]に示すように、一般的に、ネットワークの利用可能帯域や通信遅延の変動に対する制御としては、映像や音

^{†1} 日本電気株式会社 情報・ナレッジ研究所
Knowledge Discovery Research Laboratories, NEC Corporation

声の配信制御として、パケットロスの予測や利用可能帯域の変化の予測に基づく制御が、従来から行われていた。一方で、Web アクセスに関してはベストエフォートでかまわないという考え方が一般的であった。しかし、映像や音声のコミュニケーションよりも、Web サービスによるコミュニケーションが増えており、Web アクセスのリアルタイム性の向上の必要性は高まっている。また、Web による情報閲覧の利用頻度は高く、特に、混雑している時間帯や繁華街での Web アクセスの安定化が大きな課題となっている。

本稿では、既存の Web アクセス制御技術の課題を整理し、通信状態の予測技術について解説する。そして、通信状態の予測技術に応じた Web アクセス制御のフレームワークについて提案して、それぞれのネットワーク状態予測に基づいた Web アクセス制御技術について紹介する。最後に、シミュレーションによってフレームワークの効果を検証する。

2. 既存の Web アクセス制御技術

2.1 既存方式の仕組み

無線ネットワークで Web アクセスの品質を改善する代表的な方式として、先行配信制御、冗長送信制御、帯域適応制御がある。

先行配信制御は、Web ページのリンク先を先読みしてキャッシュする技術である。先読みした Web ページは通信状態によらずに安定して閲覧することができる。スマートフォンのブラウザに標準実装されていることが多く、移動中にトンネルに入る前にリンク先を先読みしておくことで、Web 閲覧を継続できる。文献[2]は遅延が大きい通信網での先読み技術であり、常に遅延しているネットワークにおいて、リンク先の Web ページを代理サーバで先読みし、UDPで一括して端末に送ることで、Web アクセスが高速になることを示している。文献[3]は先読みとスマートフォンの消費電力に関する研究である。ブラウザでリンク先の先読みを行うことで、遅延削減と帯域の有効活用ができることが示されている。

冗長送信制御は、トリガーを冗長に送信することで、通信遅延の揺らぎの影響を確率的に緩和する技術である。文献[4]は複数 TCP コネクションを利用した方式である。TCPは一連のパケットシーケンスの中でパケットロスや通信遅延が発生すると、それ以降のパケットが待たされて、通信遅延が連続的に発生してしまう性質がある。複数の TCP コネクションを同時に利用してデータを冗長送信することで、通信遅延の発生確率を軽減することが可能である。Web アクセスに関しても複数の TCP セッションで同時に HTTP 要求を行い、先に届いたリクエストに対してデータを返すことで、Web アクセスの通信遅延を抑制することができる。

帯域適応制御は、Web アクセスするときのダウンロード速度を計測して、直近の速度に応じて画像や動画の解像度を調整する技術である。文献[5]は画質調整機能を持つ

WWW サーバ技術である。直近に計測したダウンロード時間を用いて、画像の解像度等を調整して、サービス定義された時間でダウンロードが完了する。アクセス回線がブロードバンド環境かナローバンド環境かに応じて画像のデータサイズを調整することで、多様なネットワーク帯域からのアクセスが混在しても、遅延のない画像送信ができる。

2.2 既存方式の課題

既存方式は、常に通信遅延が常に悪い状況や、利用可能帯域が低い場合に、ネットワークに与えるデータ量の増加を考える必要がないケースにおいて、Web アクセスを高速化することに有益である。しかし、無線ネットワークは混雑による利用可能帯や通信遅延の変動が激しくなっており、かつ、料金体系が定額制から従量課金にシフトしてきており、ネットワークへのデータ量の増加を軽視できない。

先行配信制御をする技術の課題は、常に実施するとネットワークに多大な負荷を与えることにある。先読みしたリンク先を閲覧する割合は高くはなく、閲覧しないコンテンツのダウンロードはネットワークに負荷を与える。利用可能帯域の変動が激しいネットワークにおいて、利用品質を落とさずにネットワークの負荷を抑えるには、先読みが必要なネットワーク状態が予測されたときにだけ、前もって先行配信制御を実施することが望ましい。

冗長送信制御する方式の課題も、常に実施するとネットワークとサーバに多大な負荷を与えることにある。Web アクセスの HTTP メソッドのトリガーだけに限定しても、割り当てられた回線帯域が少ない上り方向のネットワークリソースを常に数倍消費することは問題である。通信遅延の変動が激しい場合を予測して、適応的に制御することができれば、不要な冗長送信を抑制することができる。Web アクセスにおいて、通信遅延の変動は激しく、通信遅延を検出してから冗長送信制御しても間に合わない場合が多いので、数秒後の通信遅延を予測することで、適切な冗長送信制御をすることが可能になる。

帯域適応制御に関しては、ネットワークの変化に機敏に適応できないと、画質などが必要以上に低下する課題がある。適応制御はオリジナルのソースよりも大きなデータを転送することはしないが、送受信している途中で利用可能帯域が大きく変動すると、帯域が見積もりよりも大きくなった場合には必要以上の画質の低下、帯域が見積もりよりも小さくなった場合に遅延時間の増加が発生する。

3. ネットワーク状態の予測技術

3.1 予測モデルの種類

一般的に予測モデルには確率モデルと確定モデルがある。確率モデルは、予測対象のデータの将来の変動が正規分布になることに基づき、変動幅である確率的拡散、つまり、変動がどこまで広がる可能性があるのかを表す分散値を予測する。確率モデルは予測の精度が高い一方、予測対

象のデータの変動が正規分布にならない場合、つまり、測定値がランダムウォークをしない場合にはモデルとの乖離が発生する。

一方、確定モデルではピンポイントで未来の変動値を確定的に予測する。予測対象のデータの変動に傾向や周期があり、変動のベクトルとタイミングが予測できる場合に有効な手法である。確定モデルでは変動の予測値と未来の実測値との乖離が予測精度となるが、一般的に予測精度は確率モデルほど高くない。

3.2 TCP スループット予測

ネットワークの利用可能帯域を確率モデルで予測する手法として、アプリケーションレイヤのエンドエンドの通信環境において、映像配信などで用いる TCP 通信のスループットの変動を時系列解析して、将来の確率的拡散を高精度で予測する手法がある。将来のネットワークの帯域変動の上限と下限が予測できる技術であり、たとえば、下限に合わせて適応制御することで、ネットワークの利用可能帯域が狭くなる可能性を前もって検出して、適応的な制御を実施することが可能となる。確率的拡散の広がり方の違いで、定常状態モデル、非定常状態モデル、混合状態モデルの3つの予測手法がある。

文献[6]は定常状態モデルに関する技術であり、TCP スループットの変動幅が将来にわたって一定であると仮定したネットワークを予測するモデルである。Wi-Fi アクセスなど比較的安定したネットワークの TCP スループットの分散値の予測に利用される。

文献[7]は非定常状態モデルに関する技術であり、3G アクセスのような常に変動が激しいネットワークの TCP スループット予測に利用される。TCP スループットの分散値が常に変動するネットワークに利用される。

文献[8][9][10]は混合状態モデルを利用する予測であり、LTE のようにスループットが高い状態と低い状態が不規則に変化するネットワークに有用な技術である。LTE においては高い予測精度を発揮している。直近の TCP スループットからネットワークが定常状態なのか非定常状態なのかを推定し、その混合割合を計算して、定常状態モデルと非定常状態モデルを混合するモデルを用いる。

一方、文献[11][12][13]が示すように、ネットワークの利用可能帯域を確定モデルで予測する手法も数多く存在する。将来の TCP スループットの変動をピンポイントで予測することに挑戦している。無限にある未来の TCP スループットの可能性の中から確率が高い変動パターンを予測値として選択する。しかし、TCP スループットがランダムウォークで変動し、変動パターンの変化が激しいネットワークでは、選択すべき変動パターンが多く、予測と結果のずれが大きくなり、安定しているネットワークにしか応用できないのが現状である。

3.3 通信遅延予測

通信遅延予測に関しては文献[14][15]に示すように、エンドエンドの通信遅延を予測する技術がある。通信遅延はランダムウォークで変化するのではなく、変化が激しい時間帯と変化があまりなく安定して通信遅延が少ない時間帯が混在している。さらに、TCP スループットに比べて変動の方向性に傾向がみられるので、確定モデルで予測する手法がとられる。

4. ネットワーク状態予測に基づく Web アクセス制御のフレームワークの提案

我々は、変動が激しいネットワークを利用した Web アクセスに対して、ネットワーク状態予測を利用したフィードフォワード型の制御を行うことで、ネットワークの負荷増大を最小限にして、高速な Web アクセスを可能にするフレームワークを提案する。

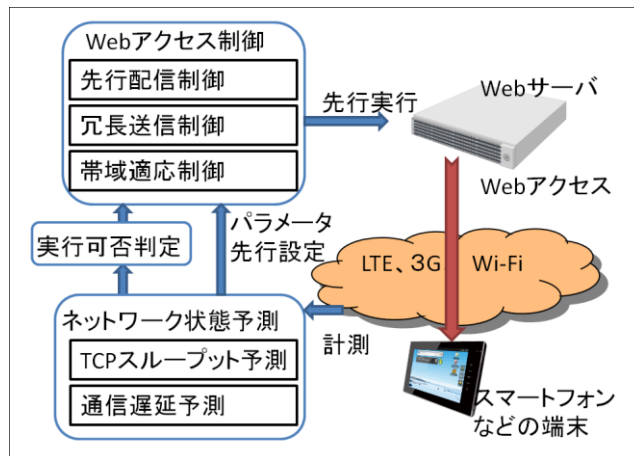


図 1 予測と制御のフレームワーク

Figure 1 Framework of control and prediction

図 1 に予測技術と制御技術を組み合わせたフレームワークを示す。ネットワーク状態予測で得られる TCP スループットと通信遅延の予測結果に基づいて、Web アクセス制御の実行可否判定を実施し、実施する場合には制御パラメータの先行設定を行う。TCP スループットまたは通信遅延が想定した閾値を割り込むと予測されたときに、Web アクセス制御を実施することで、Web アクセス制御で発生するデータ通信の増加を抑制する。Web アクセスの制御として先行配信制御と冗長送信制御、帯域適応制御があるが、特に先行配信制御と冗長配信制御は、ネットワークに流れるデータ量が増えるので、ネットワークの状態が悪い場合に限定した制御を行うこととする。

提案するフレームワークでは、TCP スループット予測を先行配信制御に利用し、通信遅延予測を冗長送信制御に利用する。TCP スループット予測に基づいた先行配信制御では、ネットワークの利用可能帯域が低下する可能性が高くなった場合に、事前に先行配信制御を開始して Web ページ

のリンク先を先読みすることで、ネットワークの利用可能帯域が少ない場合でも高速な Web ページの閲覧を可能にする。通信遅延予測に基づいた冗長送信制御では、通信遅延のばらつきが増加する直前から、Web ページへアクセスする HTTP のリクエストヘッダを複数の HTTP セッションを用いて送信することで、通信遅延のばらつきが大きい時間帯だけに、複数の HTTP セッションで冗長送信する。一方、帯域適応制御としては、文献[16]が示すように、TCP スループット予測に基づいて配信速度のパラメータを設定することで映像のペーシング配信が実施できる。

5. 制御方式

5.1 TCP スループット予測に基づいた先行配信制御

TCP スループットの変化を予測し、ユーザが最低限必要な帯域（制御判定ライン）を下回ったと判定したときに先行配信制御を実施する。Web ページのリンク先を読み込む先行配信に必要な時間を見積もり、その時間内に TCP スループットが限界帯域を下回ることが予測したときに、先行配信を開始する。予測のアルゴリズムは既存的方式を利用することを前提とし、予測精度が高い確率モデルを利用する。図 2 に TCP スループット予測の判定ポイントを示す。

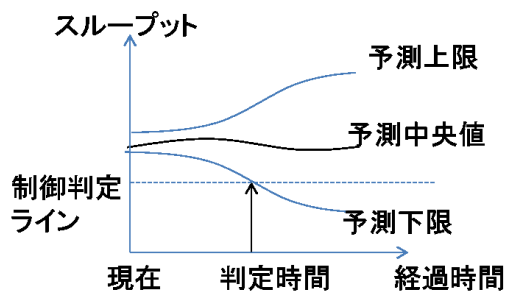


図 2 TCP スループット予測の判定ポイント

Figure 2 The judge point of TCP throughput prediction

まず、TCP スループットの判定ポイントを計算する。帯域と先行配信のデータ量から、先行配信に必要な時間を見積もる。確率モデルの TCP スループット予測では、予測の上限と下限が計算されるので、 1σ である 70% が範囲に入ると予測される予測下限をもとに制御するかを判定を行う。予測下限を使う理由は、確定値予測ができないので、通信帯域が狭まったときに、先行配信制御を実施しておく確率を上げるためである。t 秒後の確率モデルの分散値を予測下限 $P_L(t)$ 、現在のページ p に対する先行配信の推定データ量を $D(p)$ とし、スループットと時間の積を求める。

$$\int P_L(t)dt = D(p)$$

上記の計算式が成立する時間を判定時間とする。Web ページのリンク先の数とデータ量、および通信速度にもよるが、先行配信の判定時間は 30 秒～1 分程度となる。

そして、判定時間までの間に予測下限 $P_L(t)$ が制御判定ラインを下回っている場合には、先行配信制御を実施する。

制御判定ラインは下限の通信スループットであり、ユーザが許容できる最低限度の値を設定する。たとえば、LTE においては、600Kbps 程度に設定すると、3G 回線で利用していた時の通信速度を下回ることを防止できる。

先行配信の実現方式としては、図 3 に示すように、端末内にプロキシを設ける方式を用いる。端末内プロキシで TCP スループットを予測し、HTML を解析して先読みできるコンテンツに対して、ネットワークにアクセスして Web サーバから読み込みを実施して、キャッシュに保存する。

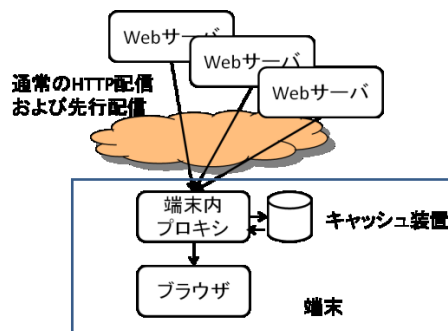


図 3 予測に基づいた先行配信の実現方法

Figure 3 An implementation of pre-download based on TCP throughput prediction

5.2 通信遅延予測に基づいた冗長送信制御

冗長配信制御は HTTP 通信をしている 10 秒程度の通信遅延の変動に基づいて、通信遅延のばらつきが激しくなると予測されるときに、冗長送信制御を行う。図 4 に通信遅延予測の判定ポイントを示す。通信遅延は確定モデルを用いることを前提とする。通信遅延は測定のために大きくぶれるので、通信遅延の移動平均を用いる。判定時間は HTTP 通信の通信最中に入る必要があるため、5～10 秒先までの区間を設定する。制御判定ラインはこれ以上遅延が大きくなったら冗長送信を実施する閾値であり、ユーザがストレスを感じない最低の遅延時間を設定する。LTE では通常は通信遅延が 20～30ms 以内であるので、たとえば 1 秒程度に設定すれば、ネットワークの状態が悪くなったとしても、通信遅延の増加を感じる頻度が低下する。

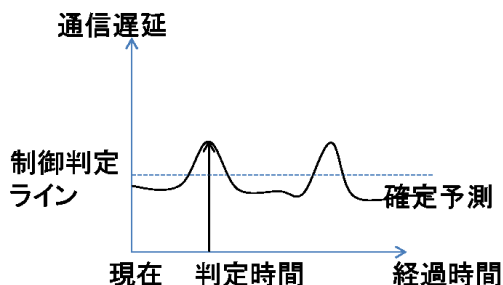


図 4 通信遅延予測の判定ポイント

Figure 4 The judge point of network delay prediction

判定時間内に通信遅延が制御判定ラインを下回ると予測した場合には、冗長送信制御を実施する。図 5 に冗長送

信の仕組みを示す。端末内プロキシのほかに中継プロキシを用いて、両プロキシ間で HTTP セッションの冗長化を行い、HTTP の要求ヘッダを重複して送信する。そして、HTTP の応答を同時に実施し、応答ヘッダを先に受け取ったセッションでデータ通信を行う。端末内プロキシと中継プロキシを同時に利用することで、汎用の Web サーバに対しても有効な制御が可能である。HTTP の応答性能が悪いときは、多くの場合、HTTP ヘッダのやり取りが遅延しているということを前提にした制御である。以上の動作によって、HTTP ヘッダのやり取りを行う時に、複数のセッションの中から最小限の遅延のセッションを選択する。

同時利用するセッションの数は、TCP スループット予想の結果を用いて利用可能帯域に余裕があると判定した場合に、パラメータ先行設定によって決定する。セッション数は「TCP スループットの予測値」×「要求時間」／「HTTP ヘッダのデータ量」で計算され、2 以上の値をとる。

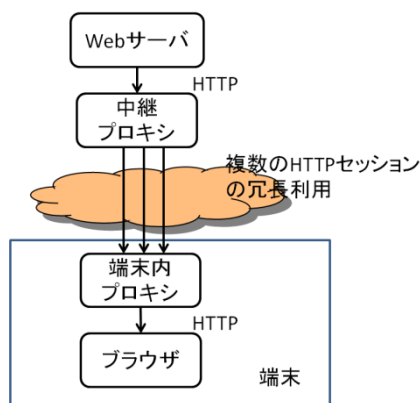


図 5 予測に基づいた冗長送信の実現方法

Figure 5 An implementation of multi session access based on TCP throughput prediction

6. シミュレーションによる効果検証と考察

6.1 シミュレーション

提案したフレームワークの有効性を検証するために、LTE でのデータ通信の計測結果をもとに、ネットワーク状態予測に基づいた Web アクセス制御のシミュレーションによる一次検証を実施した。夕方の混雑した首都圏の主要ターミナル駅周辺を移動しながら TCP 通信を行って、TCP スループットと通信遅延を計測し、計測結果に基づいてシミュレーションを行った。

まずは、TCP スループット予測に基づく先行配信制御について検証する。図 6 に計測した TCP スループットを示す。TCP スループットが大きく変動していることが分かる。このような変動する状態のときに、30 秒先のスループットの予測下限を正確に予測できたと仮定して、制御判定ラインを 600KBps のときに、現在値だけで判定して制御するか制御しないかを決定したときと比べて、予測精度に応じて

どのくらい誤制御が改善されるかをシミュレーション検証した。図 7 にシミュレーション結果を示す。現在値を見て制御の実施を判定したときに 341 回あった誤制御が、1σ の幅で予測が成功した場合には 145 回に減少した。また、予測精度が悪く、2σ の幅までの予測を利用しなければならないと仮定すると、誤制御の回数は増えていき、現在値を利用した制御のときの誤制御回数に接近していく。

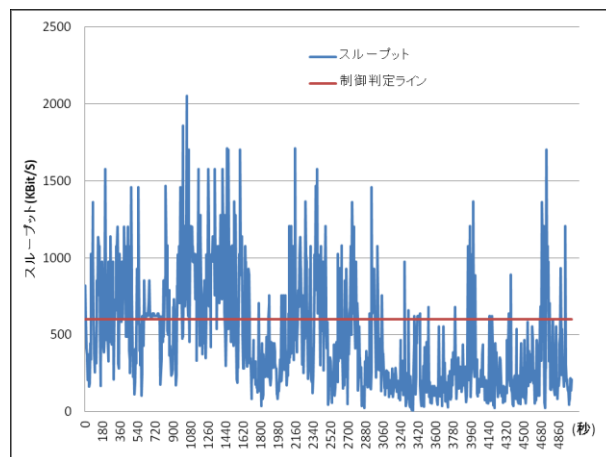


図 6 TCP スループットの変動のサンプル

Figure 6 A sample of TCP throughput Fluctuation

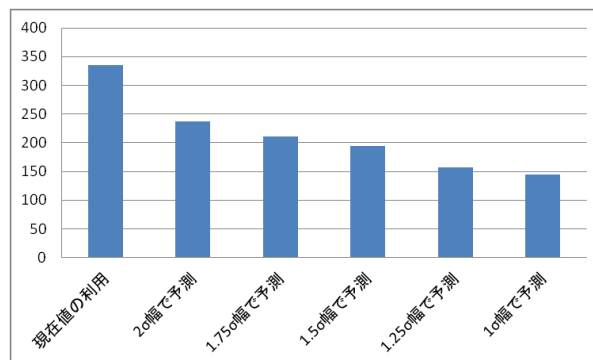


図 7 TCP スループット予測と誤制御回数の関係

Figure 7 A relation of TCP throughput prediction and wrong amount of pre-download control

次に、通信遅延予測に基づく冗長送信制御について検証する。図 8 に計測した通信遅延の変動を示す。通信遅延の変動が局所的に大きくなっていることが分かる。7 秒後の通信遅延が一定の幅に入ると仮定した予測した場合に、現在値だけをもとに制御したときと比べて、予測幅に応じてどのくらい誤制御が改善されるかをシミュレーション検証した。図 9 にシミュレーション結果を示す。現在値を見て制御の実施を判定したときに 191 回あった誤制御の数が、400ms 幅で予測する場合に 87 回に、100ms 幅で予測できたと仮定した場合には 25 回に減少した。

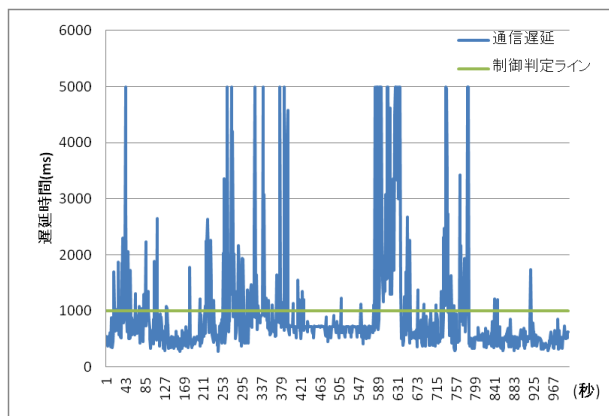


図 8 通信遅延の変動のサンプル

Figure 8 A sample of network delay fluctuation

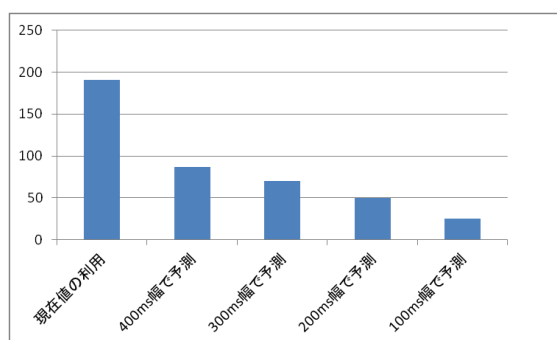


図 9 通知遅延予測と誤制御回数の関係

Figure 9 A relation of network delay prediction and wrong amount of multi session access control

6.2 考察

今回の一次検証では、ある程度の信頼度の予測でも効果が期待できることがわかった。一方、予測精度が高く、または、予測範囲を狭めることができると、線形的に誤制御の回数が減り、Web アクセス制御の効果が高くなる結果となった。予測値の信頼性を向上するには、計測する通信データの量を多く収集する必要があることが推察されるが、間欠的なデータ通信が行われる Web アクセスでは高信頼な予測をすることに限界がある。間欠的なデータ通信での予測の信頼性を向上する予測技術の開発が重要である。

また、今回のシミュレーションでは、予測結果に応じて、実際に制御を実施して通信負荷を与えてはいないので、予測結果を実際の通信との間に、違いが生じる可能性がある。しかし、ネットワーク全体に占める自身のトラフィックの割合が高い場合は、クロストラフィックが少なく、高速にネットワークを利用できる環境なので、Web アクセス制御は実施されない。逆に、自身のトラフィックの割合が低い場合には、全体に与える影響が限定的なので、予測結果との誤差は少ないと考えている。

7. おわりに

本稿では、ネットワーク状態予測に基づいた Web アクセス制御のフレームワークを提案し、シミュレーションによって効果があることを検証した。ネットワーク状態予測は、ベストエフォートなネットワークで利用可能帯域や通信遅延の反動が激しくなる無線ネットワーク上で、快適に Web アクセスするための重要な技術になっていく。今後、実際にネットワーク状態予測に基づく、Web アクセス制御を実施し、実際のネットワークを用いて効果を証明していく。

参考文献

- 1) B. Wang, J. Kurose, P. Shenoy, and D. Towsley : Multimedia Streaming via TCP: An Analytic Performance Study, ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, Vol. 4, Issue 2 (2008.05)
- 2) 永瀬文昭, 阪田徹 : 長遅延通信網での WEB 先読み方式による HTTP 高速化の実験的検証, 2010 年電子情報通信学会通信ソフトウェア大会 通信講演論文集 2, pp.99 (2010.09)
- 3) 小貫貴央, 神田尚子, 放地宏佳 : 関連データ先読みとスマートフォンの消費電力に関する研究, FIT2011, 情報科学技術フォーラム, pp.421-422 (2011.08)
- 4) 馬場昌之, 西川博文, 加藤嘉明 : 複数 TCP コネクションを利用したリアルタイム伝送方法, 情報処理学会研究会報告 AVM59, pp.71-76 (2007.12)
- 5) 中野賢, 春本要, 下條真司, 西尾章治郎 : ページ配送時間を考慮した画質調整機能を持つ WWW サーバ, 電子情報通信学会論文誌 D-1 Vol. J83-D-1 No. 1, pp.194-202 (2000.01)
- 6) S. Bohacek : A Stochastic Model of TCP and Fair Video transmission, IEEE INFOCOM 2003, Vol. 2, pp. 1134-1144. (2003)
- 7) Zhang, T. van den Berg, E., Chennikara, J., Agrawal, P. Jyh-Cheng Chen, Kodama, T. : Local Predictive Resource Reservation for Handoff in Multimedia Wireless IP Networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 19, pp. 1931-1941 (2001.10)
- 8) 吉田裕志, 里田浩三, 野垣智士 : TCP スループットの確率的拡散予測に基づく映像配信制御, インターネットコンファレンス 2011 論文集, pp. 57-66 (2011.10)
- 9) 吉田裕志, 里田浩三 : 単位根検定を用いた TCP スループットの定常性解析, 信学技報, Vol. 112, No. 209, IN2012-56, pp. 39-44 (2012.09)
- 10) 吉田裕志, 里田 浩三 : アプリケーションレベルでの TCP スループットの定常性解析と予測モデル構築, 信学技報, Vol. 112, No. 352, IN2012-128, pp. 39-44 (2012.09)
- 11) Q He, C Dovrolis, M Ammar : On the Predictability of Large Transfer TCP Throughput, ACM SIGCOMM '05, Vol. 35, Issue 4, pp. 145-156. (2005)
- 12) M Mirza, J Sommers, P Barford, X Zhu : A Machine Learning Approach to TCP Throughput Prediction, in ACM SIGMETRICS '07, Vol. 35, Issue 1, pp. 97-108. (2007)
- 13) François Baccelli, David R. McDonald : A Stochastic Model for the Throughput of Non-Persistent TCP Flows, VALUETOOLS '06. (2006)
- 14) Singh, J.P., Kumar, P. and Singh, S.K., "Delay prediction in Mobile Ad Hoc Network using trapezoidal fuzzy numbers : International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE), pp. 60 - 64 (2012.03)
- 15) Parlos, A.G., "Identification of the Internet end-to-end delay dynamics using multi-step neuro-predictors," International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Vol. 3, pp. 2460 - 2465 (2002)
- 16) 里田浩三, 吉田裕志, 伊藤博紀, 小澤一範 : TCP スループットの確率的拡散予測に基づく適応ビデオキャッシング方式の評価, 電子情報通信学会大会講演論文集 巻 : 2012 p.143 (2012.03)