

博士論文審査報告書

論文題目

Researches on TCP Throughput Prediction
and Adaptive Bitrate Control in Mobile
Network

モバイルネットワークにおけるTCPスループ
ット予測と適応レート制御に関する研究

申請者

魏	博
Bo	WEI

情報理工・情報通信専攻 画像情報研究

2019年2月

インターネットの急速な発展やマルチメディアコンテンツの大容量化に伴い、スムーズなメディアストリーミングを提供する技術開発がますます重要になっている。通信的な視点からは適応レート制御が重要になり、ネットワークの混雑時は送信レートを下げてメディア再生の中断を回避しつつ、帯域に余裕がある場合は送信レートを上げて高スループットで低遅延の伝送を提供する。これにより、高い通信品質（**QoS: Quality of Services**）と高いメディア品質（**QoE: Quality of Experience**）が実現され、さらには冗長トラフィックの削減や、無線ネットワークでは通信の低消費電力化にも貢献する。一方、とりわけ移動しながら無線通信を行うモバイルネットワークにおいて通信品質の変動は顕著になり、モバイル端末にはさまざまな通信環境への対応が求められる。通信品質予測はこのための対策の一つであり、ラウンドトリップ遅延やパケット廃棄率等の **QoS** 変数を推定式に当てはめる公式ベース手法と、過去の通信履歴から推定を行う履歴ベース手法に大別され、近年は機械学習の発展を背景に、後者の履歴ベース手法の開発が活発に進められている。また、スマートフォンの普及を背景に、スマートフォンに搭載されたセンサー群を利用して、日々の移動履歴を記録したり、日々の行動パターンを推定しようとする試みも各種行われている。これらは間接的に無線通信品質に影響を与えると考えられ、入力変数として、通信品質予測への組み込みが考えられる。

本論文は以下の 6 つの章から構成されている。

第 1 章では、本論文の背景と構成を説明している。モバイルネットワークにおける通信品質予測と適応レート制御の重要性を説明した上で、二つの **TCP (Transmission Control Protocol)** スループット予測方式と一つの適応レート制御方式の提案と評価を行ったことを説明している。

第 2 章では、本論文の関連研究の説明を行い、無線通信、ユーザの移動パターン認識、**TCP** スループット予測、適応レート制御、**QoS** と **QoE** に関する最近の研究開発動向をまとめている。

第 3 章では、本論文の第一のスループット予測方式として、**HOAH (Hybrid Prediction with the Autoregressive Model and Hidden Markov Model)** と呼ばれる方式の提案と評価を行っている。この **HOAH** では、過去のスループット履歴に基づき、自己回帰モデルによるスループット予測と、隠れマルコフモデルによるスループット予測を適応的に切り替える。自己回帰モデルによるスループット予測は、基本的に、線形回帰に基づくスループット予測を行い、比較的静的な状態時に有効に機能する。また、隠れマルコフモデルによるスループット予測では、過去のスループット履歴から、予め学習済みのガウス混合モデルによる状態推定を行い、隠れマルコフモデルによる状態遷移としてスループット変動をモデル化し、将来のスループット予測に活用する。また、自己回帰モデルと隠れマルコフモデルの切り替えのためにサポー

トベクトルマシンを用意し、過去のスループット履歴の統計量に応じて、適応的に二つの予測手法を切り替える。その上で、インターネット上に公開されている通信履歴データ、および、大学周辺で収集した通信履歴データを用いた評価実験とを行い、従来方式に対する提案方式の有効性を実証している。

第4章では、本論文の第二のスループット予測方式として、時系列データの機械学習に頻繁に用いられる LSTM (Long-Short Term Memory) を活用した TRUST (ThRoUghput prediction based on lSTm) と呼ばれる方式の提案と評価を行っている。この TRUST では、過去のスループット履歴だけではなく、無線信号の RSSI (Received Signal Strength Indication)、時刻、場所、無線基地局 ID 等を入力とし、スループット予測を実行する。特に、予測モデルの性能を向上させるために、前処理としてユーザの移動パターン (静止、徒歩、自転車、バス、自動車等) を推定し、その移動パターンに応じて予測モデルを切り替える。一方、大学周辺で静止、徒歩、バスの通信履歴を収集し、また、大学、自宅移動時の電車の通信履歴を収集し、深層学習モデルの学習を行った。その上で、これらの実測データを用いた実験結果として、TRUST が従来手法との比較として、静止、歩行、バス、電車それぞれの場合において、スループットの予測誤差を、最大 38%、40%、44%、34% 削減できることを示している。

第5章では、MPEG-DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP) を用いた映像配信における、スループット予測を活用した適応レート制御の提案と評価を行っている。MPEG-DASH では、ビットレートの異なる複数の圧縮セグメントをサーバ上に蓄積しておき、ユーザが自身の受信環境に応じた適切なビットレートのセグメントを選択する。ここで、スループット予測を行わない従来のレート制御方式では、セグメント受信時のスループット観測値に応じて次セグメントを選択するため、モバイル網のようなスループット変動が大きなネットワークではリバッファリング (再生中断) 等の弊害を引き起こすことがある。これに対して本章の提案である適応レート制御では、リバッファリング、スタートアップ遅延、ビットレート変動の影響を含む QoE 推定式を活用し、これにスループット予測の結果を反映することで、未来を見越した QoE 値を最大にするように次セグメントを選択する。実映像コンテンツを使用した実験結果として、提案する適応レート制御方式は、従来方式に比して平均ビットレートを増加させ、かつ、余分なりバッファリングを回避でき、推定 QoE 値として 32.1% の改善を実現している。

第6章では、本論文の結論と今後の課題についてまとめている。

以上、本論文は、モバイルネットワークにおけるスループット予測、および適応レート制御に関するものであり、それぞれにおいて従来手法よりも有効な方式を示し、学術的にも実用的にも高く評価できる。よって本論文は博士 (工学) 早稲田大学の学位論文として価値あるものと認める。

2019年2月

審査員 主査 早稲田大学教授 博士（工学）東京大学 甲藤二郎

署名日：

早稲田大学教授 Ph.D. Univ. of Illinois 中里秀則

署名日：

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 前原文明

署名日：