

氏 名 小口 直樹

学位(専攻分野) 博士(情報学)

学位記番号 総研大甲第 1832 号

学位授与の日付 平成28年3月24日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 TCP 輻輳制御アルゴリズムの動的切り替えによるインタラクティブ通信の性能改善に関する研究

論文審査委員 主 査 准教授 阿部 俊二
教授 漆谷 重雄
教授 計 宇生
准教授 福田 健介
教授 戸出 英樹 大阪府立大学
特任教授 山田 茂樹 国立情報学研究所

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

今日、クラウドサービスが広く普及しており、組織における PC の紛失や盗難による情報漏えい、設備投資削減、省電力などの観点から、多くの企業が、従業員の PC をシンクライアントに置き換え、クラウド上で提供される仮想デスクトップサービス(DaaS)への移行を検討している。

仮想デスクトップサービスのようなインタラクティブ(対話的)なアプリケーションにおいては人が快適に利用可能な応答時間は一秒以下とも言われる、そのため、数十 ms から数百 ms の性能劣化がアプリケーションの使用感に大きく影響する。

しかしながら、仮想デスクトップサービスの多くは、トランスポートプロトコルとして TCP (Transmission Control Protocol)を用いるため、外出先からモバイルデバイスにより国外のクラウドにアクセスするといった、ネットワークの遅延や、無線網におけるパケット廃棄が多い利用形態では、通信性能が劣化しやすい。

また、一般に、大容量のファイル転送を行うアプリケーション(例えば FTP: File Transfer Protocol)は、十分な量の送信データを、TCP のパケット送信速度よりも速い速度で OS に対し送信依頼するため、TCP の輻輳ウィンドウサイズは輻輳制御アルゴリズムの設計上の最大速度で広がる。一方で、仮想デスクトップサービスのように、端末の操作に対しサーバが応答データとして画面の更新情報を送信するインタラクティブなアプリケーションは、比較的送信データ量が少ないため TCP の輻輳ウィンドウサイズが広がりやすく、瞬間的なデータ送信に時間がかかることから、アプリケーションの応答性能が低下するという問題がある。

こうした要因により、クラウド上の仮想デスクトップサービスは、応答性や操作性が悪化しやすく、なかなか利用が進まないのが現実である。

これまで非常に長い時間をかけて TCP の様々な輻輳制御アルゴリズムの研究が行われ、特定の通信環境において効率的に通信を行える輻輳制御アルゴリズムが複数提案されてきた。しかし、これらの輻輳制御アルゴリズムは、アプリケーションの送信データサイズや、往復遅延時間(RTT: Round Trip Time)、廃棄率といったネットワークの特性により、その応答性能が優位となる通信環境が異なる。例えば TCP Hybla と呼ばれる輻輳制御アルゴリズムは、RTT が小さい時は他の輻輳制御アルゴリズムよりもゆっくと輻輳ウィンドウサイズを広げるが、RTT が大きいと最も速く輻輳ウィンドウサイズを広げるようになるため、衛星通信など RTT が大きい環境で高い応答性能を示す。また、TCP Westwood と呼ばれる輻輳制御アルゴリズムは、無線のエラーが多い環境で高い応答性能を示す。このように、ある特定の通信環境において、理想的な輻輳制御アルゴリズムを設計することは可能である。しかし、無線アクセス網を介したクラウドを利用する形態のように、ネットワークの特性が様々な要因で変化し得る通信環境で常に理想的な応答性能を示す輻輳制御アルゴリズムを設計することは困難であると考えられる。

そこで、本論文ではインタラクティブなアプリケーションにおいて、通信路の品質に合わせ最適な TCP の輻輳制御アルゴリズムを動的に選択することで、通信アプリケーション

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

が一時に連続送信するデータの最初から最後のパケットまでの転送時間(レイテンシ)を改善する方法(Reconfigurable TCP)を提案した。本提案方式は、3 個以上連続的に廃棄が発生した場合(バースト的廃棄)と高々2 個までの連続廃棄が発生した場合(非バースト的廃棄)という二つの廃棄パターンにより、Linux OS の TCP が輻輳制御において異なる挙動を示すことに着目し、これら廃棄パターン毎の廃棄率と、RTT に応じて最適な輻輳制御アルゴリズムを選択するものである。

次に提案方式を NS-3 ネットワークシミュレータに実装し、GE (Gilbert-Eliott)チャンネルモデルを用いた固定無線環境において評価した。本評価では実際の Wi-Fi 網の廃棄特性を計測し、この廃棄特性に合わせ GE モデルのパラメタを決定し提案方式を評価した。さらに、IEEE802.16e(WiMAX)をモデル化した移動無線環境における評価も行った。シミュレーションによる評価では、最大 45%の応答時間の改善が得られた。

さらに、提案方式を Linux OS に実装し、LTE 網を用いた移動無線環境で実機評価を行った。実機評価では、最大 34%の応答時間の改善が得られることがわかった。

これらの評価から、通信路の品質に合わせ最適な輻輳制御アルゴリズムを動的に切替える本提案方式は、様々な環境で応答時間改善効果が得られ、クラウド環境で仮想デスクトップサービスなどのインタラクティブなアプリケーションを利用する際のレイテンシ改善の一手段になり得ることを示した。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本博士論文は、インターネットクラウドサービスの一つである仮想デスクトップサービス (DaaS: Desktop as a Service、ダース) を、遠隔のモバイル端末/PC 等のクライアントからインタラクティブに利用する際の TCP 通信のレスポンスタイム短縮化の性能改善に係る研究成果をまとめたものであり、全 7 章で構成されている。DaaS は、PC の OS やアプリケーション等のほとんど全ての計算機環境をクラウド上で提供するサービスであり、利用者側にとってこれまでの高機能・高性能な PC は必ずしも必要でなく、インターネット接続機能程度を有するモバイル端末/PC 等のクライアント端末で環境に優しい利用が可能である。さらにデータもクライアント端末に保存する必要が無く、端末の紛失や盗難による情報漏洩等のセキュリティ問題の心配も軽減される。この様に、DaaS は、社会的問題の解決の一つの手段としての利用の促進が期待されている。

本論文の第 1 章と 2 章で、DaaS 利用の促進が期待されているにもかかわらず、利用が進んでいない現状を述べ、その要因の一つとして DaaS を利用する際に行われるクライアント端末とクラウド間の通信で、TCP を用いて行われるインタラクティブな通信のレスポンスタイム性能が悪いことを示し、さらに TCP 通信の性能改善に係る技術の調査と整理から、レスポンスタイムの性能改善方法として、通信経路の通信品質状況に応じて既存の TCP 輻輳制御アルゴリズムを動的に選択切替する必要があることを述べており、本研究の背景、目的とその課題を明らかにしている。

第 3 章では、既存の TCP 輻輳制御アルゴリズムを動的に選択切替することを目的に、LinuxOS に標準搭載されている 9 種類の輻輳制御アルゴリズムについてのレイテンシ (レスポンスタイムの内での主となる応答データの転送遅延) 性能を、クライアント端末とクラウドサービス提供サーバ間の通信経路の packets 転送遅延と packets 廃棄率の通信品質、packets 廃棄パターン、転送されるバースト情報量のパラメタから比較を行い、各輻輳制御アルゴリズムの性能優位領域を明らかにしている。

第 4 章では、レイテンシ性能改善のための通信経路の通信品質から既存 TCP 輻輳制御アルゴリズムを動的に選択切替する Reconfigurable TCP 方式を提案している。具体的には、先ず、第 3 章で明らかにした各輻輳制御アルゴリズムのレイテンシ性能優位領域を表現するために、シミュレーションを用いて事前に各輻輳制御アルゴリズムのレイテンシ特性テーブルを作成・登録し、実際の TCP 通信経路の packets 転送遅延を RTT から算出し、バースト的廃棄と非バースト的廃棄の packets 廃棄パターン毎の廃棄率を計測・算出し、これらの算出値を用いて登録テーブルを参照し、最小なレイテンシとなる輻輳制御アルゴリズムの選択切替を周期的に行う方式である。さらに提案の方式と他の TCP が混在利用された場合の性能に関わる公平性についても検討されており、公平性を保つ提案方式の制御法などが述べられている。

第 5 章と 6 章は、提案方式の有効性の評価を行っている。評価では、提案方式を LinuxOS 搭載のモバイル PC 等に実装し、モバイル PC-クラウド間との通信網を模擬したシミュレーションによるレイテンシ性能評価と LTE の実網を用いたレイテンシ性能評価を行い、有

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

効性を実証している。さらにレイテンシ性能評価を体感品質の観点からも考察し、方式の有効性を示している。

第 7 章で本論文の結論と今後の課題が述べられている。

出願者は、本研究に係る査読付きジャーナル論文 1 篇と査読付き国際会議論文 3 篇（フルペーパー 2 篇、ポスター発表 1 篇）の発表がなされている。

本論文の提案内容は、新規性、有効性、信頼性が十分に備わっており、また本研究分野関連の学術専門外国書籍においても提案方式が参照・紹介されるなど、学術的価値も十分に認められる。さらに産業界への貢献も十分に期待できる論文内容である。したがって、本論文は博士の学位請求論文として合格と判断した。