



高信頼ネットワークの実現に向けた通信サービス品質の計測・制御技術の研究

著者	山崎 康広
URL	http://hdl.handle.net/10236/00028215

氏名	山崎 康 広
学位の専攻分野の名称	博士 (工学)
学位記番号	甲理第186号 (文部科学省への報告番号甲第688号)
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位授与年月日	2019年3月16日
学位論文題目	高信頼ネットワークの実現に向けた通信サービス品質の計測・制御技術の研究
論文審査委員	(主査) 教授 大崎 博之 (副査) 教授 巳波 弘佳 石橋 圭介 (国際基督教大学准教授)

本論文では高信頼ネットワークの実現に向けた通信サービスの計測・制御技術の研究に取り組んでいる。論文の前半部では、汎用的な高速通信プロトコルとして利用される TCP (Transmission Control Protocol; 伝送制御プロトコル) の通信品質を効率的に計測する研究に取り組んでいる。通信の高速化・高機能化に対応するために、パケットサンプリング技術が既存の通信機器に既に導入されている。しかしながら通常のパケットサンプリングでは「パケットロス」という直接観測できない事象の発生を計測することが出来ない。そこで本論文ではパケットロスと関連する、計測可能な別の事象に着目し、サンプリング計測における、当該事象の被計測確率を解析的に求めることにより、パケットロス率を推定する手法について述べている。論文の後半部では、特殊な用途に特化した通信ネットワークにおいて高信頼通信を達成するための制御技術に関する研究に取り組んでいる。車載ネットワークに対する要求条件は、汎用の通信ネットワークであるインターネットの要求条件とは大きく異なっている。小データ通信のパケットロスにより生じる遅延時間の増加は、インターネットにおいてはそれほど大きな問題とはならないが、車載ネットワークではサービス品質が許容できない程度まで劣化する可能性がある。このため、従来の通信プロトコルである TCP をそのまま車載ネットワークへ適用するのではなく、パケットロス発生時の性能劣化を軽減する手法を加えることにより車載ネットワークへの適用を可能とする手法について述べている。また、耐災害ネットワークの研究開発もこれまで活発に行われているが、端末間のアドホック通信を用いた情報共有システムの実現やその配信アルゴリズムの研究開発が中心となっており、通信インフラが偏在しているような環境下におけるネットワーク設計手法や通信性能に関する検討はほとんど行なわれていない。そこで本論文では、一部に通信インフラが存在する場合の情報配信遅延時間や通信基地局の配置について述べている。

論文内容の要旨

本論文は計7章で構成されており、各章の内容は以下の通りである。

第1章は序論として高信頼性ネットワークが必要となる背景と本論文での取り組みについて述べている。

第2章から第4章は汎用的な高信頼性通信として通常利用される TCP のパケットロス計測に関する取り組みである。

第2章はパケットサンプリング技術の一つであり、サンプリング計測環境下で、通信の受信端末から送信端末に向けた確認応答信号を観測することにより、TCPのパケットロスを計測する手法を詳述している。ここではTCPの確認応答番号の推移から判定できる「重複ACK (ACKnowledgement; 確認応答)」という現象を観測すると、サンプリング計測環境下では通常観測が困難な「パケットロス」という指標が観測できることを詳解している。さらにサンプリング計測観測下で観測できる重複ACKが本来発生した重複ACKの何割に相当するかを導出している。この二つの関係性により、TCPのパケットロスを計算する方法について述べている。

第3章も第2章同様、パケットサンプリング技術の一つであり、TCPのパケットロスを計測する手法を詳述している。2章と同じ経路の通信品質を計測するが、2章とは逆方向のパケット(通信の送信端末から受信端末に向けた通信)を観測する。2章の「重複ACK」という現象の代わりに、3章では「シーケンス番号の逆転数」に着目すれば、サンプリング計測環境下では通常観測が困難な「パケットロス」という指標が観測できることを詳解している。さらにサンプリング計測観測下で観測できるシーケンス番号の逆転数が本来発生したシーケンス番号の逆転数の何割に相当するかを導出している。この二つの関係性により、TCPのパケットロスを計算する方法について述べている。

第4章は第2章の計測において重要な要因となる「重複ACK」を高速に計測する手法を詳述している。第2章の手法は2回以上同一のACK番号が連続した回数が必要となる。ここで2回以上であれば正確に何回のACK番号が連続したかどうかは不要である。この特徴に着目し、特定の数までは高速に計数可能なスペースコードブルームフィルタを使うことで「重複ACK現象」を低い計算コストで計数できることを解説している。さらにスペースコードブルームフィルタ特有の計測誤差をクーポンコレクタ問題として捉え、確率的に補正できることを示している。

第5章と第6章は特殊用途に特化したネットワークで高信頼通信を達成するための取り組みである。

第5章は車載ネットワークにおいてアプリケーションレベルの通信遅延を短縮する手法を詳述している。車載Ethernetの典型的なユースケースとして、送受信間の組で定期的にTCPを使った1パケットの情報伝達を行う場合がある。この場合、パケットロスが生じるとアプリケーション体感の遅延時間が大幅に増加する仕組みについて解説している。さらにゴーストパケットという特殊なパケットを追加することで強制的にTCPの高速再送機構を駆動することで、アプリケーション体感の遅延時間を短縮可能であることを示している。

第6章は耐災害ネットワークにおいて情報伝搬遅延時間を短縮する機構について詳述している。災害時でも一部のネットワークインフラが利用できる可能性があり、このような状況下では、災害エリアでの情報伝搬遅延時間を短縮できる可能性がある。本論文では一部ネットワークインフラが利用できる場合(カットスルーリンクが存在する場合)の情報伝搬速度について詳述している。さらにネットワークインフラがどのように配置している場合に情報伝搬遅延の短縮に効果があるかについて分析している。

第7章は各章で得られた結論を総括している。

論文審査結果の要旨

ネットワークは常に通信速度が高速化しており、その品質計測には多大なコストが必要となってきた。これを解決する技術としてパケットサンプリング技術が注目されている。ただし、パケットサンプリングは一部のパケットしか観測対象としていない。このため観測事象から何かを計測することは可能であるが、観測できなかった事象を推定することは一般的に容易ではない。パケットロスも計測地点を通過しなかったパケットの量であり、本来計測困難な項目である。本論文ではパケットロスを直接観測できない「計測地点を通過しなかったパケット」、ではなく、観測可能な別の事象「重複 ACK」や「シーケンス番号の逆転」とみなすことで、サンプリング計測環境下での計測を可能としている。さらに TCP パケットロスの計測において、送信端末から受信端末に向けた通信品質を、ACK 側パケットの観測でもシーケンス側パケットの観測でも可能とする方式を提案している。これにより計測地点の片方向のパケットロスがから双方向の通信品質の計測を可能としている。さらに、重複 ACK のみを効率的に計数する手法を考案することで、システム全体の処理負荷を従来の数十分の一まで低減可能であることを示している。これにより、今後のネットワーク高速化にも対応可能な計測機構を実現している。

車載ネットワークは、今後 TCP/IP 技術の導入が見込まれている分野である。ただし、要求条件が、インターネットへの適用と車載ネットワークへの適用において異なるため、単純に技術移転をするだけではなく、車載ネットワークの要求条件に合致した通信方式への改変が必要となる。本論文で取り組んでいる技術もその一環であり、小データ通信のパケットロスにより生じる遅延時間の増加は、インターネットではそれほど深刻な問題を生じさせないが、車載ネットワークでは大きな問題となる危険性がある。このため、従来の TCP をそのまま適用するのではなく、パケットロスによって生じる通信遅延の増大を抑える手法を考案することにより、車載ネットワークにも適用可能な TCP を実現している。

耐災害ネットワークも、通常時ではなく、ある特殊な環境下における通信アプリケーションである。東日本大震災を機に IT 技術により災害時の情報提供を円滑に行うための研究開発が各機関で行われている。一般には、端末間通信を用いた情報共有システムやその配信アルゴリズムの研究が活発に行われている。その一方、一部に通信インフラが存在している際の検討はほとんど行われていない。本論文は一部に通信インフラが存在する場合の情報配信遅延時間や通信基地局の配置について検討しており、現実的な条件下における通信環境を詳細に検討している。

本論文の内容の一部は、申請者を筆頭著者として、専門誌である電子情報通信学会論文誌 [英文 1 編、和文 2 編] に掲載されている。また IEEE CCWC (Computing and Communication Workshop and Conference) などの国際会議の英文プロシーディングスにもまとめられている。本論文の一部の研究発表に対して、電子情報通信学会から、学術奨励賞、テレコミュニケーションマネジメント研究賞、コミュニケーションクオリティ研究会奨励賞も授与されている。以上から審査委員会は申請者が十分な発信能力と英語運用能力を持つと判断した。

審査委員会は本論文の内容を中心に審査会を開き、また公開の論文発表会を行い、申請者が論文内容および関連する分野において十分な理解と学識を有していること、さらに、将来の研究遂行について十分な能力を有していることを確認した。よって審査委員会は、本論文提出者である山崎康広氏が博士 (工学) の学位を授与されるに足る十分な資格を有するものと判定する。