

早稲田大学大学院国際情報通信研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

Network Coder Optimization for Peer-to-Peer Content Distribution

P2P コンテンツ配信のための
ネットワークコーダの最適化

申 請 者

Dinh Nguyen Quoc

国際情報通信学専攻
分散コンピューティングシステム研究II

2013年 7月

大量のデータを効率よく複数の端末（ピア）に配送する方式として、ピア同士が相互にデータを交換するピア・ツー・ピアネットワークを利用した方式が近年広く利用されている。特に、このピア・ツー・ピアを利用した方法の中でも、データを一定のサイズのブロックに分割し、ブロックを単位として隣接ピア間で相互に未受信ブロックを同時並列に交換する **BitTorrent** の配送効率が良い。

一方、ネットワーク内のノードで、そのノードが既に受信した複数ブロックから符号化により新たなブロックを合成し転送するネットワークコーディングも、複数の宛先にデータを転送するマルチキャストにおいて、配送効率を向上させることができる。特に、ネットワークを構成するすべてのノードで符号化を実施した場合、ネットワークのもつリンク帯域やトポロジの許容する範囲内で、最大の配送効率を得られることが知られている。このときに、各ノードが自律的に乱数で係数列を発生させ、その係数列の各要素と各々のブロックとの積をとり加算するランダム線形符号化という方式を使うことにより、ノード間の連携を取る必要なく、最大の効率を得ることができる。

これら二つの技術、**BitTorrent** とネットワークコーディングを組み合わせることにより、大量のデータを効率良く複数ピアに配送することができる。しかしながら、**BitTorrent** との組み合わせにおいて、すべてのピアで符号化を行うのではなく、元々データを保持する情報源でのみ符号化を行う場合でも、配送効率が大幅に向上する可能性があることが既に報告されていた。このことから、申請者は必ずしもすべてのピアで符号化を行わなくても、すべてのピアで符号化を行った場合と同等の効率を得られる可能性があることに着目した。一方これまでのネットワークコーディングの研究では、ピア間の連携を取ることなく最大効率を得られる利点から、特定のピアにおいてのみ符号化を行うことは検討されてこなかった。また同様の視点から、符号化を行う場合に、既受信のブロックから符号を生成すべきブロックを選択する方法やピア間で交換するブロックの決定プロトコルといった詳細についても検討されていなかった。

本論文は、**BitTorrent** を用いたデータの複数ピアへの配送において、ネットワークコーディングが配送効率を向上させる仕組みを解析し、その解析結果を基にネットワークコーディングを適用する上での最適手法を求めたものであり、申請者が博士後期課程において行った研究成果をまとめたものである。なお、本論文は英語で記述されている。

以下、各章毎に概要を述べ、評価を加える。

第 1 章 “Introduction” では、研究背景と研究の目的を述べるとともに、本論文の技術的な貢献についてまとめている。また本論文が前提とする技術である **BitTorrent** およびネットワークコーディング、および関連研究の状況を紹介している。最後に本論文の構成を示している。

第 2 章 “System Model” では、本論文で仮定するネットワークコーディン

グを用いたピア・ツー・ピアデータ配送システム（以後、NCP2P）を定義している。

第3章“Protocols and Data Selection Algorithm”では、一部のピアのみで符号化を行う NCP2P (H-NCP2P) で必要となる、ピア間での制御情報交換プロトコルおよび送信を要求するブロックを選択するアルゴリズムを提案している。H-NCP2P では、符号化を行わないシステムやすべてのピアで符号化を行うシステム (F-NCP2P) と異なり、2 種類のピアが存在することになる。そのため、単純に既存の BitTorrent の情報交換プロトコルを流用すると、情報交換する相手のピアがどちらに属するかによって 2 種類の制御情報交換プロトコルが必要になる。ここでは、両方のピアに対して制御情報交換を可能にする単一のプロトコルを提案している。さらに、符号化を行うピアについて、符号化により新たなブロックを構成するために用いる既受信のブロック選択方法についても最適効率を実現する方式を提案し、効果の評価を行っている。

符号化を実施する/しないという 2 種類のピアを統合して制御情報を交換する必要が存在するのは、H-NCP2P であるためであり、H-NCP2P は本論文で初めて提案されたものであるため、プロトコルに加えてシステム提案自体も新規性が高い。

第4章“Minimal Delay Coder Placement”では、ピア・ツー・ピアシステムによる転送において発生する、転送データの重複について厳密な解析を行い、その上で、データ転送効率を最大化する符号化ピア配置アルゴリズムを提案している。

具体的には、符号化を行わない BitTorrent によるデータ転送効率低下の原因が転送データの重複に依ることを解析的に突き止め、ネットワークコーディングによってその重複を解消することにより配送効率の向上を実現できることを明確にした。この解析により求めた重複データ量の計算手法を用いて、各ピアのデータ重複への寄与を元に、各ピアの配送遅延への寄与量求め、その寄与量の多いピアから符号化を実施するピアを決定するアルゴリズム (MDPA) を開発した。MDPA によって求めた配送遅延への寄与量の大きいピアにおいて符号化を実施することにより、配送遅延を最小とすることができ、効率の良い配送を実現できる。MDPA を利用し、少ない符号化ピア数により不必要な符号化を削減しつつ、F-NCP2P と同等の配送効率を実現することができる。

ネットワークコーディングによる配送効率向上の根拠を明確にしたことは、今後ネットワークコーディングを利用する上での基礎となる重要な貢献である。

第5章は“Centrality-based Coder Placement”と題し、MDPA を簡略化し、計算量の少ないアルゴリズムを提案している。MDPA の計算複雑度は、 V をネットワークのノード数、 E をノード間を結ぶリンクの数とすると $O(VE^3)$ と表すことができる。 E は $O(V^2)$ 程度の量であるため、このアルゴリズムの計算コストは比較的高いものと考えられる。そこで本章では、この計算複雑度を低減させるアルゴリズムの検討を行っている。

第4章での解析から、多くの経路が通過するピア、および帯域の広い経路が通過するピアが、より多くのデータ重複を起こす原因となることがわかった。そこで、この二つの条件に合致するピアを特定するための指標として、“betweenness centrality”と“flow centrality”の二つを用いるアルゴリズムをそれぞれ提案した。Betweenness centrality および flow centrality を用いたアルゴリズムの計算複雑度はそれぞれ $O(E)$ および $O(V^2E^2)$ となり、計算量を低減することができる。また、配送効率についても、MDPA よりは低下するものの、それに近い効率が得られることが示されている。

計算複雑度を削減できたことにより、ネットワークトポロジーが動的に変動する場合に対しても、対処できる可能性が生まれた。一般にピア・ツー・ピアシステムでは、ピアは動的にネットワークへの参加、離脱を行うために、ネットワークトポロジーは定常的に変化する。そのため、動的な変動に対処できるアルゴリズムの提案は、実際のピア・ツー・ピアシステムへの適用の可能性を示したという意味で重要な提案である。

第6章“Coding Redundancy Ratio”では、ここまで提案したアルゴリズムで選定した符号化を実施するピアにおいて、どの程度の符号化を実施すべきかについて検討を加えている。この検討により、ネットワーク構成から、データ重複を避けるために必要な最低限の符号化量というものを解析的に求めることができ、その量以上に符号化を実施しても配送効率が改善しないことを示している。本章での成果も、配送効率を維持しつつ、無駄な符号化を回避する本論文の課題をさらに極めたものであり、ネットワークコーディングの最適化に係わる重要な成果である。

第7章“Conclusion and Future Work”では、本研究の成果をまとめ、さらに将来の研究の方向性について述べている。

以上要するに本論文は、ネットワークコーディングがマルチキャストにおける配送効率を向上する本質的な理由を見極め、その上で、符号化により消費する計算資源の低減、および最適化の手法を提案、評価したものである。インターネットを通じた大量データの交換がグローバルな規模で行われている一方、資源の枯渇が世界的な問題となっている現在、本論文で取り上げたインターネットでのデータ配送の高効率化とそのため使用資源最適化は、これら課題に対して真正面から取り組んだものということができ、国際情報通信学の発展に寄与するところが極めて大きい。よって本論文は、博士（国際情報通信学）の学位を授与するに値するものと認める。

2013年7月24日

審査員

主任	早稲田大学教授	Ph.D. (イリノイ大学)	中里秀則
	早稲田大学教授	工学博士 (新潟大学)	佐藤拓朗
	早稲田大学教授	工学博士 (東京大学)	田中良明
	早稲田大学教授	工学博士 (東京大学)	津田俊隆

