

審査の結果の要旨

氏 名 中 村 遼

本論文は「Improving Packet Transport in Virtual Networking by Encapsulation Techniques (仮想ネットワークにおけるカプセル化技術を用いたパケット転送性能の向上)」と題し、英文で記されており、6章から成る。インターネットの根幹を成すInternet Protocol(IP)は、1980年代、規模性に優れた単一のネットワークを構築するためのプロトコルとして設計・実装された。そのため、クラウドなどに代表される現代の多様化したシステムの要求に対して十分な対応性を持たない一方で、普及したがゆえにIP自体に変更を加えること困難であるという問題を抱えている。本論文は、IPトンネリングを用いたネットワークアーキテクチャの再整理を行い、既存のプロトコルや機器には変更を加えずに、仮想ネットワークにおけるパケット転送性能を向上する技術・アーキテクチャを提案したものである。

第1章では、研究の概要を述べている。第2章「Internet Architecture and Its Side Effects」では、IPのコモディティ化と、クラウドやデータセンター環境の例を通してIPと既存技術の課題を整理し、その課題に対する本論文の論点と位置付けを概説している。IPベースのネットワーク機器やアプリケーションが支配的になり、それらに変更を加える、または新規のもので置き換えるのは現実的ではない。一方で、IPでは実現できない現在のシステムの要件として、ネットワークの多重化と効率的なリンク利用によるネットワーク全体の帯域向上を挙げ、それぞれを実現する既存技術であるIPトンネリングではカプセル化処理に起因するエンドホストでのパケット送信性能の低下が問題となり、パススイッチングではネットワーク機器のハードウェアに変更が必要であるとしている。本論文は、既存のプロトコルや機器に一切の変更を加えることなく、エンドホストとネットワークの双方におけるパケット転送性能の向上を実現することを目的としている。

第3章「Virtual Networking」では、複数のトンネルプロトコルを概説し、トンネリングの抽象化と仮想ネットワークのためのアーキテクチャの導入を行っている。本来ネットワークにおけるトンネルとは、2つの離れたノード間を接続する仮想的なリンクを構築する技術である。本論文では様々なトンネルプロトコルの分析を通して、トンネルとは、通信先のホスト識別子に応じてネットワーク上の宛先を決定し、カプセル化する処理であると定義している。これに基づいて、トンネルという「仮想リンク」を境界レイヤーとし、仮想リンクの内側をアプリケーションによるデータ通信のための識別子空間としてのネットワーク、仮想リンクの外側を単純なパケット配送のための物理ネットワークとして分離し、それぞれを異なるネットワークプロトコルスタックのインスタンスで扱うアーキテクチャを導入している。この2つを分離することで、アプリケーションのデータ通信に影

響を与えることなく物理ネットワークにおけるパケット配送の最適化が可能になることについて述べている。

第4章「Improving Packet Transport at End Hosts」では、トンネル処理によってエンドホストのパケット送信性能が低下する問題に取り組んでいる。まず現状のLinuxカーネルでトンネルを使用した際のボトルネックの分析を行い、カプセル化後の各レイヤーにおける宛先検索処理が大きな比重を占めていることを明らかにした。この分析結果に基づき、カプセル化後の各レイヤーにおける宛先検索をトンネルの宛先検索処理に併合して実行する手法を提案している。またトンネルプロトコルごとの検索処理の違いを吸収する手法を同時に提案し、異なるプロトコルを単一のハードウェアにオフロードできる可能性を提示している。そしてソフトウェアで実装した提案手法の評価を通じて、トンネルの利用によるオーバーヘッドを削減し、異なる5つのトンネルプロトコルにおいてエンドホストのパケット送信性能を向上できることを定量的に示している。

第5章「Improving Packet Transport at Networks」では、データセンターネットワークにおけるマルチパスを特別なハードウェアを用いずに実現する方法を提案している。汎用のIPルータでは最短経路でしかパケットを配送できず、トラフィックを複数のパスに効率的に分散して配送することができない。本論文では、エンドホストのネットワークスタックに変更を加え、ひとつのパケットに途中通過すべきルータを宛先とする複数のトンネルヘッダを付与して送信することで、任意のパスにパケットを通す手法を提案している。既存研究がルータのハードウェアに変更を加えてマルチパスを実現するのに対して、本手法はトンネルを利用することで、汎用のIPルータで構築されたネットワークにおいて、エンドホストが主導してトラフィックを分散する。これによって、既存のネットワーク機器やプロトコルに変更を加えることなく、複数のパスを利用したトラフィック配送を実現している。また提案したマルチパス手法をFat-treeとRandom Graphの2つのデータセンタートポロジに適用し、実機による予備実験とシミュレーションを通してネットワーク全体の転送性能を向上できることを示している。

第6章「Conclusion」では、本論文の研究成果をまとめている。

以上を要するに、本論文は、現在の多様化するシステムの要求に対して機能不足な状況となっている一方で、広く普及したが故に変更を加えることが容易でなくなったIPネットワークに対して、旧来のトンネル技術を新しい仮想ネットワークのためのアーキテクチャとして再整理することでさらなる発展の可能性を示し、さらにエンドホストとネットワークの双方において転送性能を向上する手法を提案した。これは、インターネットという実際に運用されるシステムに対する現実的かつ実効的な貢献であり、情報理工学における創造的実践の観点で価値が認められる。

よって、本論文は、博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。