

ネットワーク内コンピューティングを応用したインターネットアーキテクチャーの継続的な進化に向けて

Toward Continuous Evolution of the Internet Architecture Leveraging In-Network Computing

小泉 佑揮¹
Yuki Koizumi

武政 淳二¹
Junji Takemasa

長谷川 亨²
Toru Hasegawa

日下 卓也²
Takuya Kusaka

渡部 康平³
Kohei Watabe

¹ 大阪大学
Osaka University

² 島根大学
Shimane University

³ 埼玉大学
Saitama University

1 はじめに

インターネットの利用用途が多様化する一方で、インターネット研究のコミュニティにおいて、現行のインターネットアーキテクチャーがその変化に十分対応できていないという問題意識が広がっている[1, 2, 3]。同時に、ハイパースケーラーのデータセンターにコンピューティングとネットワークが集中した結果、ハイパースケーラーのネットワークやデータセンターに有利なプロトコルのみが選択的に進化し、インターネットの分散システムとしての利点が損なわれているのが現状である。これらの課題に対して、我々は、ネットワーク内計算技術を活用し、コンピューティングとネットワークを融合し、コンピューティングの革新と将来的なインターネット用途のさらなる多様化や拡張にも適応可能な、持続的に進化するインターネットアーキテクチャーの基盤構築を目指す。

2 研究背景

2.1 クリーンスレートインターネットアーキテクチャー

ネットワークアプリケーションの普及に伴い、インターネットの利用形態と設計思想が乖離していることに注目し、この課題を解決するため、インターネットアーキテクチャーの進化を目指す研究への関心が高まっている。多くは、新たなインターネットアーキテクチャーをゼロから設計する“クリーンスレート”型アプローチが採用された。その代表例として、Koponenら[4]やJacobsonら[5]が提唱した情報指向通信(ICN)や、Perrigらが提唱したパスペースインターネットアーキテクチャー(SCION)[6]などが挙げられる。しかし、これらのアーキテクチャーは既存のインターネットの中核であるIPとの相互運用性に欠けるなど、多くの提案が普及に至らなかった。

2.2 進化可能なインターネットアーキテクチャー

一方、ここ数年はIPベースのインターネットアーキテクチャーの革新に研究の焦点が移行しつつある[1, 2, 3]。McCauleyら[1]は、これまでのクリーンスレートインターネットアーキテクチャーの現状をふまえ、インターネットコミュニティにおける二つの矛盾した合意を指摘している。つまり、現行のインターネットアーキテクチャーがセキュリティ上の課題や、利用用途と設計思想の乖離に起因する非効率性など、複数の欠陥を抱えているという点で広く合意があるが、その一方で、IPを変革することは、それがどれほど正当化されるものであっても、極めて困難であるという点でも同様に合意が形成されている。McCauleyら[1]は、このような状況下で、IPベースのイ

ンターネットの持続的な進化を図るTrotskyを提案した。

Balakrishnanら[2]は、ハイパースケーラーによるプライベートなネットワーク内ではアーキテクチャーが進化しているのに対して、パブリックインターネットのアーキテクチャーは、数十年にわたって変化していないという問題を指摘している。これに対して、Trotsky[1]の概念を整理したExtensible Internet(EI)を提言している。TrotskyとEIの基本的なコンセプトは、ネットワーク機能を提供するアーキテクチャーであるIP(3層:L3)と、サービス依存の機能を提供するアーキテクチャー(3.5層:L3.5)を分離し、IPの課題を解決するL3.5プロトコル群をL3にオーバーレイすることである。TrotskyやEIの一実現例として、[1, 2]では、L3.5アーキテクチャーを相互変換するエッジノードを段階的に配備する方法を提示している。例えば、IP上にICNやSCIONをオーバーレイし、エッジノードでこれらを相互変換する。

2.3 プログラマブルデータプレーン

我々は、これらの提言の重要性を鑑み、進化可能なインターネットアーキテクチャーの実現を目指している。その基盤技術として、それとは独立して注目されているプログラマブルデータプレーン技術とそれに基づくネットワーク内コンピューティングに注目している。

現在、スマートNICやFPGAなどのアクセラレーターに対して、ネットワーク処理の一部をオフロードする研究に注目が集まっている[7]。さらに、Bosschartら[8]が提唱したプログラマブルスイッチは、コンピューティングを計算機から分離することで、その可能性を大きく広げた。その結果、ネットワーク処理のみならず、汎用の計算をプログラマブルスイッチ上で実行する、あるいはそれを支える技術に関する研究が進んだ[9]。これらの成果は、インターネット内で計算をするネットワーク内コンピューティングを可能にした。

3 研究プロジェクト構想

3.1 グランドチャレンジへの挑戦と研究目標

我々のプロジェクトでは、ネットワーク内コンピューティングを用いて、インターネット規模のコンピューティングプラットフォームを実現するとともに、その利点を応用することでTrotskyやEI[1, 2]の概念をより高度化し、インターネットが継続的に進化するための基盤の確立を目指す。

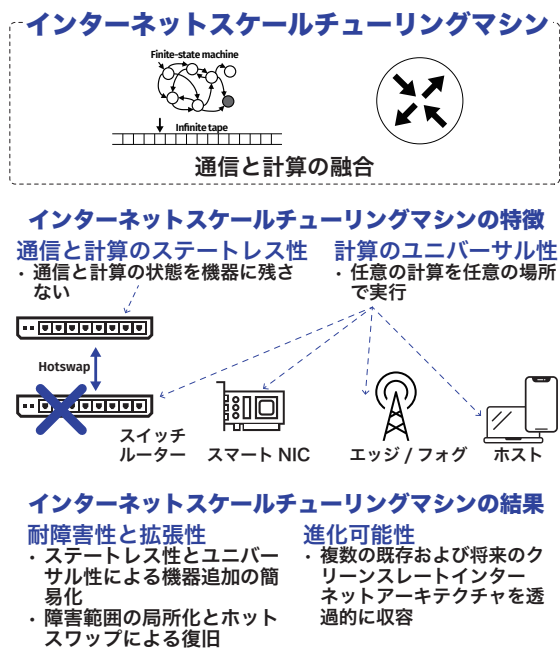


図1 プロジェクト構想

3.2 インターネットスケールチューリングマシン

本プロジェクトの目的を達成するための核となるインターネットスケールチューリングマシンの構想を図1にまとめる。インターネットスケールチューリングマシンによるネットワーク内コンピューティングにより、Trotskyのアーキテクチャー変換を真に透過的な形でネットワーク内で実現することで、将来にわたり多様なネットワークアーキテクチャーの収容するインターネット基盤を確立する。

インターネットスケールチューリングマシンを実現するため、本プロジェクトは、プログラマブルスイッチやスマートNIC、FPGAなどのプログラマブルデータプレーン技術を用いて、次の2つの性質を満たすコンピューティングプラットフォームを実現する。

コンピューティングのユニバーサル性 任意の計算を実行可能であることを達成する。これにより、インターネット自体を大量の計算ノードを有する超並列コンピュータとして利用することを可能にする。これを実現するための鍵となるアイデアが、プログラマブルスイッチをチューリング完全な計算ノードとすることである。

コンピューティングとネットワークのステートレス性 機器に計算や通信の状態を残さない、ステートレスな方法を実現する。これにより、任意の場所で計算やプロトコル処理が可能となる。また、IPのようなスケール性と、機器故障の影響が広がらない、故障した機器がホットスワップ可能であるなどの観点で耐障害性を達成できる。

3.3 想定する社会的効果

プロジェクト成果の社会的な効果は、将来にわたるインターネットの継続的な進化可能性を実現することである。これにより、ハイパースケーラーによる寡占から脱却し、インターネットの真の分散化とそれによる継続的

な発展を可能にする。

3.4 インターネットスケールチューリングマシン応用

本プロジェクトでは、インターネットスケールチューリングマシンの応用として、ICN、5G、セキュリティプロトコルなど、[1, 2]で議論されているインターネットが抱える課題を解決するネットワークアーキテクチャーを開発する。

4 提案プロジェクトとJST CRONOS理念との親和性

我々の目指すインターネットアーキテクチャーの革新と、JST CRONOS（中尾領域）が目指す「革新的な研究開発」および「情報通信と情報科学を融合させ次世代の社会の基盤を形成」との親和性の高さから、我々は、これらの課題を解決するための研究プラットフォームとして、JST CRONOSを選択した。

5 おわりに

本稿では、JST CRONOS（中尾領域）採択課題「インターネットスケールチューリングマシンと応用」を紹介した。

謝辞

本研究は、JST CRONOS (JPMJCS24N3) によるものである。

参考文献

- [1] J. McCauley *et al.*, “Enabling a permanent revolution in internet architecture,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, 2019.
- [2] H. Balakrishnan *et al.*, “Revitalizing the public internet by making it extensible,” *SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 51, May 2021.
- [3] L. Brown *et al.*, “An architecture for edge networking services,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, 2024.
- [4] T. Koponen *et al.*, “A data-oriented (and beyond) network architecture,” *SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 37, Aug. 2007.
- [5] V. Jacobson *et al.*, “Networking named content,” in *Proceedings of ACM CoNEXT*, 2009.
- [6] A. Perrig, P. Szalachowski, R. M. Reischuk, and L. Chuat, *SCION: A Secure Internet Architecture*. Springer, 2017.
- [7] S. Panda, Y. Feng, S. G. Kulkarni, K. K. Ramakrishnan, N. Duffield, and L. N. Bhuyan, “Smartwatch: Accurate traffic analysis and flow-state tracking for intrusion prevention using SmartNICs,” in *Proceedings of ACM CoNEXT*, 2021.
- [8] P. Bosshart *et al.*, “Forwarding metamorphosis: Fast programmable match-action processing in hardware for SDN,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, 2013.
- [9] Y. Yoshinaka, Y. Koizumi, J. Takemasa, and T. Hasegawa, “High-throughput stateless-but-complex packet processing within a tbps programmable switch,” in *Proceedings of IEEE ICNP*, Oct. 2024.