

ハードウェアフレームジェネレータを用いた Linux サーバのレイテンシ分析

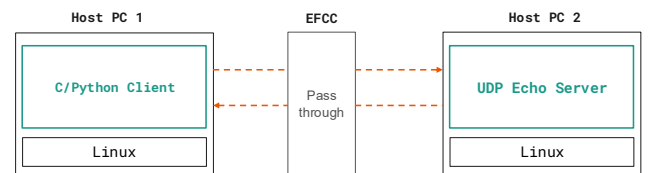
藤井 大悟¹ 広瀬 崇宏¹ 深井 貴明¹

1. はじめに

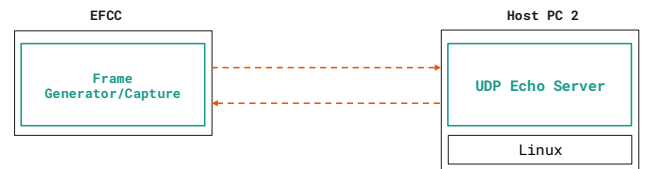
ポスト 5G 時代の分散システムでは、エッジ、クラウド、デバイス間での協調動作において、通信および処理のわずかな遅延変動がシステム全体の安全性・信頼性を左右する。産業用制御や車載ネットワークでは数ミリ秒単位の応答保証が安全性の前提となる。それらを支えるネットワークエッジのマイクロサービスやサーバレスアプリケーションにおいても、時間確定的な応答が求められる。このような要求に応える技術として Time-Sensitive Networking (TSN) が低遅延かつジッタの少ない通信を提供するが、計算ノード内部の OS スケジューリングや割り込み、バッファリングなどの非決定的要素は全体の遅延に影響するため、TSN だけではシステム全体の時間確定性を保証することは不十分である。

これらの処理を時間確定的に実行するには、計算ノードにおける処理レイテンシを正確に計測する必要がある。正確なレイテンシ計測により、OS スケジューリングや割り込み、バッファリングなどによる処理揺らぎや通信遅延の影響を定量的に評価でき、システム全体としての時間確定性を検証できる。しかし、従来の評価手法はソフトウェアベースのクライアントやシミュレーション環境での計測が中心で、実際のハードウェア挙動が反映されず、遅延やジッタを正確に評価することは困難であった。

本研究では、計算ノードにおける処理レイテンシ特性を精密に評価するため、FPGA ベースのハードウェアフレームジェネレータである EFCC [1] を用いて実験を行う。一般的な計算環境である Linux サーバを対象とし、ハードウェア実装に基づく高精度なトラフィック生成・計測により、Linux サーバのレイテンシ特性を詳細に分析する。また、同条件下でソフトウェアベースのクライアントを用いた場合との比較を行い、性能上の限界や計測誤差要因を明らかにすることで、ハードウェア計測が持つ優位性と、従来のソフトウェア計測手法が抱える課題を示す。



(a) ソフトウェアクライアント構成



(b) ハードウェアクライアント構成

図 1: 実験システム概要図

2. 評価方法

Linux サーバ上でのレイテンシ性能を精密に評価するため、クライアントからサーバへの UDP エコー通信による Round-Trip Time (RTT) 測定を行い、送信レート、パケットロス、および RTT の揺らぎを評価した。クライアントには C と Python 実装によるソフトウェアクライアントとハードウェアパケットジェネレータである EFCC を用い、それぞれ同一ネットワーク条件下で比較した (図 1)。Host PC 1 と Host PC 2 の間に EFCC を配置しているが、これはハードウェアクライアント構成とケーブル接続を共通化するためであり、EFCC はパケットを素通しする。

比較の結果、ソフトウェアクライアントでは OS スケジューリングや割り込み処理に起因する送信タイミングのジッタにより、送信レートおよび RTT に大きなばらつきが生じ、Linux サーバの遅延変動の構造を十分に捉えることができなかった。一方、EFCC は安定した送信レートと小さな RTT 揺らぎを実現し、ネットワーク内部で生じる遅延の周期性や遅延変化の様子が明瞭に観測された。これらの結果は、Linux サーバ上での時間確定的処理やネットワーク挙動を高精度に評価するには、ハードウェアベースのトラフィック生成がより高い時間分解能と決定性を提供

¹ 国立研究開発法人産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

することを示している。

謝辞

この成果は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託事業「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」（JPNP20017）の結果得られたものです。

参考文献

- [1] Akram Ben Ahmed, Takahiro Hirofuchi, and Takaaki Fukai. EFCC: Ethernet Frame Crafter & Capture for TSN Research. In *2025 IEEE 50th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, October 2025.