

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11936

研究課題名（和文）汎用NICによる高精度タイムスタンプの応用に関する研究

研究課題名（英文）Utilize Fine-grained Timestamp on commodity NICs

研究代表者

岡田 和也（Okada, Kazuya）

東京大学・情報基盤センター・特任助教

研究者番号：10732349

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、マイクロ秒精度で同期可能な汎用ネットワークインタフェースカード（NIC）を用いて、高精度タイムスタンプの活用を目的として実施した。当該NICを複数用いネットワーク機器を介した処理の遅延について実験と評価を行った。また、商用ISPネットワーク、全国規模の実験ネットワークに計測サーバを複数設置し、高精度なタイムスタンプを利用したネットワーク品質の計測を実施した。各サーバから特定サーバへの遅延を計測し、PTPハードウェアタイムスタンプを用いることでサブマイクロ秒精度でのゆらぎ計測しその特徴を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、高精度な時刻情報のネットワークでの計測利用における効果を実際の計測を元に明らかにした。また、映像音声といったリアルタイム通信に欠かせない低遅延な通信を、ソフトウェアを用いて実現するための課題を明らかにした。今後、研究の結果明らかになったバッファ、優先制御に関する課題を解決し、ソフトウェアによる柔軟でリアルタイムな通信実現に寄与すると考える。

研究成果の概要（英文）：This research explores the possibilities of fine-grained time stamps by PTP-capable Network Interface Cards (NICs). We deployed measurement servers that can send measurement packets with PTP-based hardware time stamps on Japan's significant east and west data center. We analyze and reveal delay and jitter characteristics of real-time communications in the long-distance network environment.

研究分野：コンピュータネットワーク，セキュリティ

キーワード：ネットワーク 時刻同期

1. 研究開始当初の背景

インターネットに接続される端末の急激な増加とアプリケーションの多様化に伴い、ネットワークの大規模化、高速化、仮想化が行われその監視と運用は非常に複雑なものとなっている。ネットワークの監視技術には、Simple Network Management Protocol (SNMP) が広く利用されている。SNMP では監視対象となるルータ、スイッチといったネットワーク機器からインターフェースのトラフィック量などを定期的を取得し、監視ツールでの可視化や異常検知を行う。しかし、SNMP のデータ取得は機器負荷となるため、5分間隔での取得が一般的である。そのため、把握可能なトラフィック量は5分間の平均値となり、瞬間的なトラフィック量とは大きな差がある。例えば、1Gbpsのインターフェースで連続する4分間の実トラフィックが0Gbpsであっても、続く1分間に1Gbpsのトラフィックが流れると、SNMPでは5分間連続して200Mbps流れたように見えてしまい、実際のトラフィック量を正しく把握できない。

こうした問題に対して、より詳細にネットワークの状況を把握する仕組みとして、ネットワークテレメトリと呼ばれる技術が機器ベンダにより提供されている。しかしながら、ネットワークテレメトリを用いても取得可能なトラフィック情報は秒間隔程度に止まっている。

IP ネットワークの運用では、ネットワーク上で発生する障害の早期検知と原因究明を迅速に行うために、様々な監視が行われている。例えばルータ・スイッチで転送されるトラフィック量、拠点間の疎通性、経路、各種ログ監視が行われている。特にトラフィック量の把握は、トラフィックの傾向からサイバー攻撃や経路上の異常を早期に発見したり、将来の設備検討に重要である。トラフィック監視には、インターネット技術の標準化団体 Internet Engineering Task Force (IETF) で標準化された Simple Network Management Protocol (SNMP) が用いられている。SNMP では監視サーバが監視対象のルータ、スイッチから数分間隔でデータ取得を行い、機器のインターフェイスで転送されたトラフィック量の値などを記録する。既存の SNMP では分単位でのトラフィック量しか把握できず、瞬間的なトラフィック量の変化を捉えられない。この問題を改善するためにルータ・スイッチベンダは、ネットワークテレメトリと呼ばれる秒単位でデータを取得可能な技術を提供している。大規模な DoS/DDoS 攻撃のように多量のトラフィック送受信される断続的な通信であれば、分・秒単位の計測であっても検知可能である。しかしながら、昨今のネットワークはインターフェースの高速化・広帯域化(40Gbps, 100Gbpsイーサネットの登場)により常時多量のトラフィックが転送され、ミリ秒・マイクロ秒単位でトラフィック流量が大きく変化する。大容量通信環境では、マイクロ秒・ミリ秒で機器の通信容量に達し受信送信バッファが溢れてしまい、後続の packets が破棄されてしまうバッファブローと呼ばれる現象が発生することが問題視されている。パケットが破棄されると端末において再送処理が発生し、通信の品質が劣化してしまうことが知られている。バッファレベルの混雑具合を知るには、ミリ秒・マイクロ秒単位での監視が必要となる。しかしながら、計測間隔をミリ秒以下まで短くすることは容易ではない。既存の IP ネットワークでは、装置の時刻同期に Network Time Protocol (NTP) が利用されるのが一般的であり、機器間の時刻同期精度がミリ秒までしか保証されていない。NTP では、原子時計から提供される時刻を頂点とし、階層的な時刻同期を実現している。

これに対して IEEE 1588-2008 として標準化された Precision Time Protocol (PTP) では、ネットワーク機器間でマイクロ秒精度での時刻同期を保証している。マイクロ秒精度の同期は、携帯網における基地局時刻同期や、放送、産業用機器、計測など産業界から求められていたものである。PTP では、全球測位衛星システム (GPS など) と同期したグランドマスタークロックから同期対象のスレーブ機器に対して、IP ネットワークを介してマルチキャスト/ユニキャストで同期する。PTP によりネットワーク内の機器間でマイクロ秒精度の同期が保証され、前述の様々な用途の要件を満たすことが可能となる。昨今 PTP に対応した汎用ネットワークカードが市販されるようになり、汎用サーバでも PTP を利用した時刻同期が利用可能になってきた。本研究では、PTP に対応した NIC が普及したネットワークを想定し、マイクロ秒精度でのタイムスタンプを送受信パケットに付与し様々な計測への応用を模索する。

2. 研究の目的

現在、PTP を利用したマイクロ秒の時刻同期は放送、携帯網での応用が始まる段階にある。本研究は、PTP に対応した NIC が普及したネットワークを想定し、マイクロ秒精度でのタイムスタンプを送受信パケットに付与し様々な計測への応用を模索し、今後利活用が進むであろう IP ネットワークの運用・管理のマイクロ秒精度の計測技術の確立を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、研究目標を達成するために次の3課題を設定した。

課題1：汎用NICを利用した高精度なタイムスタンプ可能なツール開発

マイクロ秒単位でのネットワーク計測を実現するためには、計測装置から送信するパケットに

対してマイクロ秒精度でのタイムスタンプを付与しなければならない。既存 OS の機能ではソフトウェアによる低精度のタイムスタンプや低い帯域量にしか対応できないため、マイクロ秒単位で時刻同期が可能な PTP に対応した NIC を利用し、ハードウェアによる高精度かつ高帯域に対応できるタイムスタンプングツールを設計・実装する。具体的な NIC としては、Intel 社製 X550 シリーズを検討している。

課題 2：ネットワーク遅延・輻輳計測手法の確立

本課題では、課題 1 にて実装されたマイクロ秒単位でのタイムスタンプ機能を活用したネットワークの監視方法を検討し高精度タイムスタンプにより捉えられるネットワークの特性を明らかにし、計測手法を確立する。具体的には、ネットワークのリンク利用率計測、エンド端末からのネットワーク機器のキュー混雑推定を目指す。既存のネットワークで幅広く利用されている到達性・遅延計測プロトコルである Internet Control Message Protocol (ICMP) では、宛先端末への到達可否とミリ秒単位での遅延計測となっている。ミリ秒単位ではネットワーク機器のキューの混雑状況はわからないが、マイクロ秒単位であればキューの混雑具合を推定できる可能性がある。

課題 3：大規模ネットワークにおける遅延計測実験

課題 2 では、研究代表者・研究者が所有する実験用ネットワーク装置を用いて研究室レベルでの実験と計測を通して手法の検討を行う。課題 3 では、実際の利用者トラフィックが転送されている全国規模のネットワークにおいて、高精度なタイムスタンプを利用した遅延・ジッタの計測を行う。シミュレーションや小規模なエミュレーション環境で評価する研究は多いが、実際のサービスプロバイダ相当の規模で実験する研究は少なく、提案手法の信頼性確保と計測結果の妥当性向上に大きく寄与するものとする。

4. 研究成果

(1). リアルタイムな音声通信品質の改善を目的としたインターネット回線品質計測
リモートワークの普及などでより重要になりつつあるインターネットを用いたリアルタイムコミュニケーションにおける通信品質の改善を目的として、現在のインターネット回線品質の基礎調査を実施した。リアルタイムな通信では、パケットの往復遅延やそのゆらぎが品質に大きく影響する。本計測では、現在映像・音声通信として広く使われている WebRTC の基礎通信プロトコルである UDP/RTP を模擬したトラフィックを生成し、地理的に分散した 4 箇所に設置したブロープ用マシンから、計 5 つのアクセス回線を利用してパケットの到着間隔のゆらぎを計測した。計測にあたって実装したツールは、パケットの受信時刻を記録するにあたり、Intel の LAN コントローラに実装されている PTP ハードウェアタイムスタンプを用いることで、サブマイクロ秒精度でのゆらぎが計測可能となった。

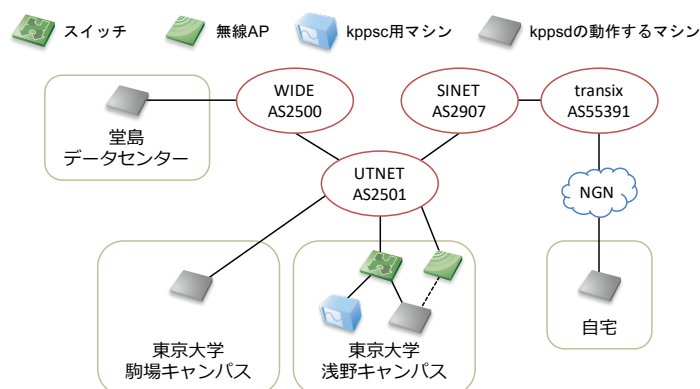


図 1. 計測構成図

計測では、AES67 を念頭に、1 Kpps で 342 バイトの UDP パケットを送信し、受信側でパケットごとの到着間隔、Inter-Packet Delay (IPD) を計測した。この IPD のゆらぎは、1 msec でパケットを受信しつづけなければならない AES67 において、リアルタイムコミュニケーションの品質に影響する。計測では、地理的に分散した 4 箇所、合計 5 つのアクセス回線を通じた一方向の IPD を一週間にわたって計測した。本計測実験から分かった結果を以下にまとめる。

- ローカル環境での有線接続は、IPD のばらつきがもっとも少なく、テール IPD も 1.05 msec 以下と、リアルタイムコミュニケーションには理想の環境である。
- 東京と大阪間の通信では、エンドツーエンドで十分な帯域が確保されていれば、ローカ

ルの有線接続ほどではないものの、99%のテール IPD でも 1.07 msec 以下と、リアルタイムコミュニケーションは可能であると考えられる。

- 一般的な家庭用アクセス回線では、十分な帯域を確保できる特殊なネットワークと比較すると、IPD のばらつき、テール IPD ともに大きくなるが、リアルタイムコミュニケーションに対して大きく影響がでるほどではないと考えられる。
- パケットを送信するホストがそれ以外のトラフィックを送受信している場合、IPD のばらつき、テール IPD ともに非常に大きくなりうる。そのため、ホスト OS 上でのパケットの優先制御を考慮する必要がある。
- 無線接続では、IPD のばらつきは定常的には大きくないものの、数パーセントの突発的なパケット転送の遅延によって、リアルタイムコミュニケーションの品質に影響しうる。

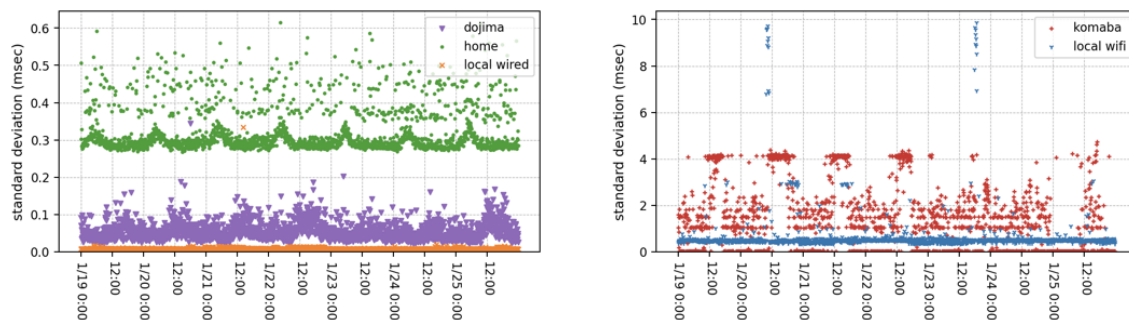


図 2. 回線ごとのジッタ変化

今後の課題として、より綿密な計測環境のセットアップを行い、再度実験を行う必要がある。今回の実験ではそれほど計測地点数も多くなく、また準備期間の都合で SD-WAN 機器に計測を相乗りさせたり、異なる実験機材を使用したりと、現象と原因の切り分けができていない部分がある。

(2). ソフトウェアを利用したリアルタイム通信の課題抽出

マイクやスピーカーの IP 化を目的に、Raspberry Pi や ESP32 のような IoT 対応 SoC を想定したフルソフトウェアによる AoIP プロトコルの設計と実装を検討した。本実装は、プロフェッショナル向け IP 伝送プロトコルである AES67 を想定し、RTP による音声データ転送、PTPv2 による時刻同期クライアント、SAP/SDP によるマルチキャストグループ管理機能から構成される。初期実験ではあるが、本ソフトウェア実装を Raspberry Pi で動作させることで、AES67 対応製品と PTPv2 による時刻同期し、音響データストリームが送受信できることを確認した。

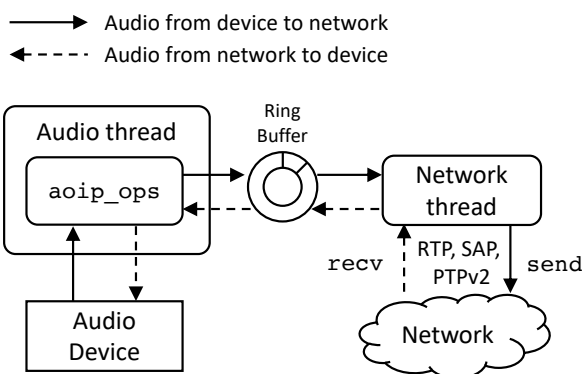


図 3. 実装された aoip-core の構成

実装と実験を通じて確認した AES67 をソフトウェアで実装する際の設計上の課題について述べる。

異なる I/O と 2 つのスレッド: 現在の実装では、異なる I/O にはそれぞれのスレッドという設計になっているが、CPU が 1 コアしかないより小型の組み込みデバイスで動作させることを考慮し、2 つの全く異なる I/O を平等にかつ高精細の時間精度で扱うことができる仕組みを考案する必要がある。

パケットの頻度に応じた優先処理: 現在のネットワークスレッドの実装では、一度のループの中で、RTP、PTPv2、SAP といったパケットがあれば処理をするようになっており、全てのパケット

を同じ優先度で扱っている。しかし、PTPv2 は 1 秒に 4 パケットなど、RTP は 1 秒に 1000 パケットなど、来る頻度は仕様によってある程度定まっている。そこで受信しうるパケットタイプの頻度を前提とした優先制御によって、音声ストリームである RTP パケットのさらなる高精度な送受信が可能になる可能性がある。

適切なバッファ箇所:現在の aoip-core はオーディオとネットワークという 2 つの I/O の間に Ring Buffer を持ち、ここでバッファリングを行なっている。一方でネットワーク I/O を処理するカーネルにも、例えばソケットのバッファや、NIC のドライバのキューなど、さまざまなバッファが存在する。ソフトウェアでありながらプロフェッショナルオーディオ用途としてより高い精度を求めるには、データの I/O 経路中に存在する全てのバッファについて、どのように利用すべきか、または排除すべきかを検討する必要がある。

今後も実装を進め、AES67 には無い機能として、WAN 向け機能の拡張や、GNSS デバイスと IoT デバイスを組み合わせることで、ジッタの改善などに取り組む予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中村 遼, 空閑 洋平, 岡田 和也
2. 発表標題 リアルタイムな音声通信品質の改善を目的としたインターネット回線品質計測
3. 学会等名 電子情報通信学会 インターネットアーキテクチャ研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田和也, 中村遼
2. 発表標題 Revealing Network Complexity through Passive Flow Analysis
3. 学会等名 IMC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村 遼, 空閑洋平
2. 発表標題 AES67 のソフトウェアによる実装の試行
3. 学会等名 電子情報通信学会 インターネットアーキテクチャ研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中村 遼 (Nakamura Ryo) (90804782)	東京大学・情報基盤センター・助教 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	空閑 洋平 (Kuga Yohei) (90816597)	東京大学・情報基盤センター・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関