

マルチパス QUIC を用いた移動時の通信経路喪失による パケットロス削減手法

奥西 理貴^{1,a)} 藤 睿^{2,b)} 佐藤 健哉^{1,c)}

概要: 近年、公共交通機関や自動車での移動中に車内でスマートフォンを利用し、動画や音楽、ゲームといったエンターテインメントコンテンツを楽しむ機会が増加している。屋外においては、セルラ通信(4G/5G)や無線 LAN などの複数の通信を併用し、こうした大容量なコンテンツを扱うために十分な帯域を確保することが重要となる。特に 5G や無線 LAN の利用を前提とすると、ユーザの移動に伴ってこれらの通信が通信範囲外となる状況が想定される。これにより通信を喪失するとパケットロスや再送処理が発生し、通信の利用効率を低下させる。本研究では、スマートフォンが事前に取得した基地局やアクセスポイントの情報と、また、走行中の車両から取得した将来の移動経路に基づき、走行位置ごとに利用可能な通信に切り替えることで、複数の通信の併用を効率的に行う手法を提案する。車両の移動によって通信が利用不可能となる地点に到達する時刻を計算し、ネットワークの下り方向遅延を踏まえてその通信の利用を事前に停止することで、パケットロスを削減する。また、複数の通信をマルチパス QUIC によって併用することで、通信が利用不可能となるまでにより長時間通信を継続でき、利用可能な帯域を増加させる。

Packet Loss Reduction due to Loss of Path during Movement Using Multipath QUIC

1. はじめに

近年、公共交通機関や自動車での移動中に車内でスマートフォンを利用し、動画や音楽、ゲームといったエンターテインメントコンテンツを楽しむ機会が増加している [1], [2]。屋外においては、セルラ通信(4G/5G)や無線 LAN などの複数の通信を併用し、こうした大容量なコンテンツを扱うために十分な帯域を確保することが重要となる。複数の通信を併用するための技術として、マルチパストランスポートプロトコルが挙げられる。これはトランスポート層において複数の通信を論理的に束ねて併用することで、利用可能な帯域幅を増加させることが可能な技術である。一方で、特に 5G や無線 LAN の利用を前提とすると、ユーザの移動に伴ってこれらの通信が通信範囲外となる状況が想定される。これにより通信を喪失すると、パケットロスや再送

処理が発生し、通信の利用効率を低下させる。しかし、マルチパストランスポートプロトコルの活用において、この問題を扱った研究は見られない。

そこで本研究では、スマートフォンが事前に取得した基地局やアクセスポイントの情報と、公共交通機関や自家用車との無線通信により取得した将来の移動経路に基づき、走行位置ごとにパケットを送信する通信経路を選択することで、複数の通信の併用を効率的に行う手法を提案する。

2. 既存手法

2.1 マルチパス TCP

複数の通信を併用する既存手法の 1 つとしてマルチパス TCP(MPTCP)が挙げられる。MPTCP とは、マルチパストランスポートプロトコルのひとつで、TCP コネクションを複数の通信経路で確立し論理的に束ねることで通信の併用を可能とする、TCP 拡張の 1 つである [3]。MPTCP には複数の動作モードが存在する。フルメッシュモードでは、複数の通信を併用することで利用できる帯域を増加させることができる。また、ハンドオーバーモードでは、複数の通信をシームレスに切り替えることで、ハンドオーバに

¹ 同志社大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering

² 同志社大学モビリティ研究センター
Mobility Research Center, Doshisha University

a) riki.okunishi@nislabs.doshisha.ac.jp

b) rui.teng@nislabs.doshisha.ac.jp

c) ksato@mail.doshisha.ac.jp

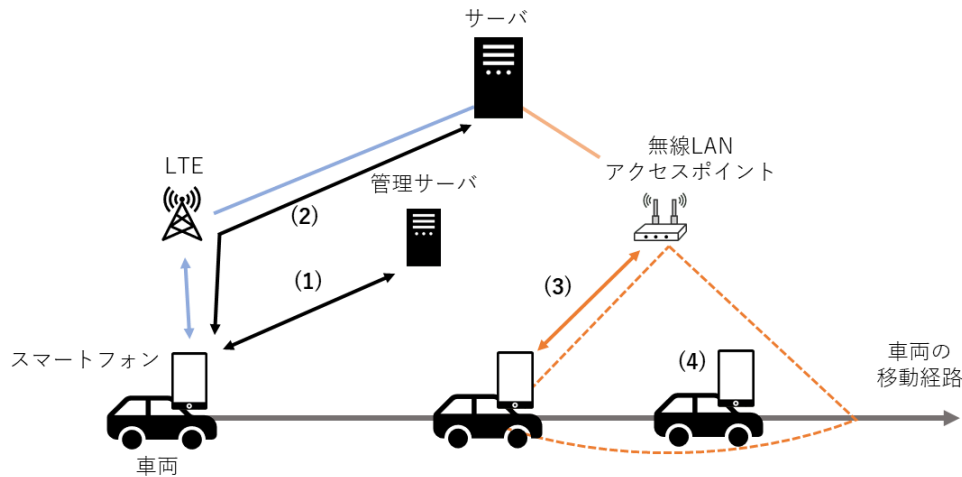


図 1 PLAMA の概要図
 Fig. 1 Overview of PLAMA.

伴う通信の一時的な切断を防ぐことができる。

一方で MPTCP には、複数の TCP コネクションを確立するという性質上、ACK パケットを別の通信経路で送信できないという制約がある。この問題は通信経路上のファイアウォールなどのミドルボックスが不審な ACK パケットを破棄してしまうことに起因しており、本質的に解決できない。そのため、通信経路を喪失し ACK パケットが到達不可能となると、再送タイムアウトまで再送処理を行うことができず、スループットが低下する。

2.2 移動体通信における MPTCP の活用

Lim らは、MAC 層のフレーム再送回数と送信成功回数をもとに、無線 LAN の接続性を判断し明示的に MPTCP に通知することで、フルメッシュモードでのスループットの向上を実現している [4]。しかし、この研究では無線 LAN での通信経路の喪失を再送タイムアウトの発生より早く検出することを目的としており、パケットロスについては議論されていない。

Sinky らは、移動に伴う無線 LAN の SNR 値の変化に応じて、MPTCP の各通信経路での輻輳ウィンドウを変化させることで、無線 LAN 間のハンドオーバーによるスループットの低下を抑え、パケットロスを削減している [5]。しかし、この研究はハンドオーバーモードを想定し、シームレスなハンドオーバーを目的とするものであり、帯域集約を実現しているものではない。

また、マルチパストランスポートプロトコルによって帯域集約を実現しながら、移動によって通信経路の喪失することで発生するパケットロスについて言及した研究は現時点では見られない。

3. 提案手法 PLAMA

3.1 概要

移動によって通信経路を喪失すると、その時点でネットワーク上で転送されているパケット（以下 InFlight パケット）が受信側に到達できずパケットロスとなる。また、通信経路の喪失に伴って ACK パケットが到達不可能となると、再送処理が遅れスループットの低下を招く。そこで本研究では、移動によって通信経路が喪失する時刻を予測し、その通信経路での送信を事前に停止することで、InFlight パケットによるパケットロスを削減する手法を提案する。また、マルチパストランスポートプロトコルとしてマルチパス QUIC(MPQUIC) を用いることで、ACK パケットを別の通信経路で送信し、再送処理の遅れを防止する。以降この手法を Path-Loss-Aware Multipath Aggregation(PLAMA) と呼ぶ。

PLAMA の概要を図 1 に示す。車両に乗ったスマートフォンが移動しながら、LTE を用いてサーバと通信を行う状況を想定する。スマートフォンは、車両から提供された将来の移動経路をもとに、その移動経路において利用可能なアクセスポイント (AP) の位置と通信可能範囲を管理サーバから取得する。利用可能な AP を通じて無線 LAN での通信も行う場合、スマートフォンは移動によってその通信を喪失する時刻を計算し、サーバに共有する。サーバとスマートフォンは、その時刻から下り方向遅延だけ遡った時刻となると、無線 LAN でのパケットの送信を停止し、以降は LTE で送信する。

3.2 通信経路を喪失する時刻の決定

PLAMA では、無線 LAN を喪失する時刻を決定するため、スマートフォンのユーザが乗る車両の将来の移動経路

と、周辺の利用可能な AP の情報（位置と通信可能範囲）を利用する。車両の将来の移動経路は、車両からスマートフォンへ定期的に提供される。また、周辺の利用可能な AP の情報は、車両から提供された移動経路をもとに、スマートフォンが利用可能となる AP の情報を管理サーバから取得する。得られた移動経路と、AP の位置と通信可能範囲から、の交点から、無線 LAN での通信が喪失する地点を求め、移動経路からその地点に到達する時刻 T_L を計算する。

ここで、アクセスポイントの通信可能範囲は、フリスの伝達公式から得られる式 (1) を変形した式 (2) を利用して設定されているものとする。ここで、 L_0 は参考距離 $d_0 = 1$ [m] での伝搬損失 [dBm]、 P_t は送信電力 [dBm]、 T は受信信号のエネルギーの閾値 [dBm]、 n は伝搬損失指数を表す。

$$L = L_0 + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 \quad (1)$$

$$d = d_0 \times 10^{(P_t - T - L_0)/10n} \quad (2)$$

3.3 下り方向遅延の測定

PLAMA では、サーバからクライアントへの下り方向遅延を測定するために、サーバが送信するパケットにタイムスタンプを付与する。クライアントはパケットの受信時刻とそのタイムスタンプから、その通信経路での下り方向遅延の計測値 RTT_{down} を計算し、それをサーバへ返送する。

そして、クライアントとサーバは、 RTT_{down} を平滑化して利用する。平滑化には、[6] での Smoothed RTT と同様に以下の式 (3) を利用する。本研究では、 $\alpha = 0.125$ としている。

$$SRTT_{new} = \alpha SRTT_{old} + (1 - \alpha) RTT_{down} \quad (3)$$

3.4 MPQUIC による ACK 送信

PLAMA では、マルチパストランスポートプロトコルとして MPQUIC を用いる。MPQUIC とは、トランスポートプロトコルである QUIC[7] の拡張として提案されているマルチパストランスポートプロトコルである [8]。QUIC ではヘッダ情報のほとんどを暗号化することで、ミドルボックスによる介入を防止している。そのため MPTCP とは異なり、MPQUIC では ACK パケットを別の通信経路で送信することができる。

PLAMA で用いる MPQUIC では、無線 LAN でのパケット送信を停止する時刻になると、スマートフォンは ACK パケットを別の通信経路上で送信するものとする。これにより、ACK パケットが到達しないことで再送処理が遅れることを防止する。

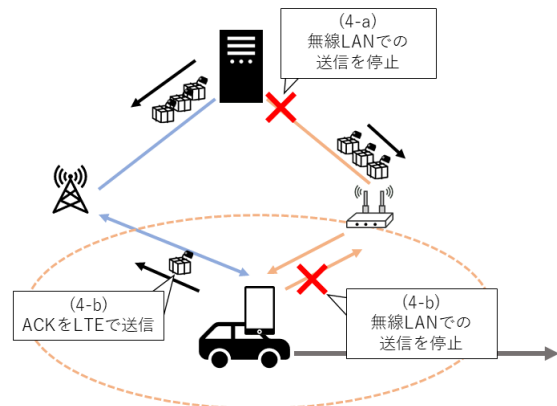


図 2 時刻 T_P における PLAMA の動作
 Fig. 2 Behavior of PLAMA at time T_P .

3.5 動作手順

PLAMA の動作手順を説明する。ここで、図 1 中の番号と、以下の動作手順の番号の処理は対応している。

- (1) スマートフォンは、車両から移動経路が提供されると、その移動経路において利用可能とある AP の位置と通信可能範囲を管理サーバから取得する。
- (2) スマートフォンは、車両の移動経路とアクセスポイントの情報から、無線 LAN を喪失する時刻 T_L を計算し、サーバに共有する。
- (3) スマートフォンは、取得した AP の通信可能範囲に入ると、無線 LAN での通信も開始する。
- (4) T_L から下り方向遅延だけ遡った時刻 T_P になると、図 2 で示すように、サーバとスマートフォンはそれぞれ以下のように動作する。
 - (a) サーバは、無線 LAN でのパケットの送信を停止する。
 - (b) スマートフォンは、無線 LAN でのパケットの送信を停止する。また、受信したパケットに対する ACK パケットは LTE で送信する。
- (5) (1) から (4) を繰り返す。

4. 評価

4.1 シミュレーション環境

評価は、オープンソースのネットワークシミュレータである Mininet-Wifi[9] を用いて行う。MPQUIC の実装には、Go 言語で実装されたライブラリ [10] を利用する。シミュレーション環境を図 3 に示す。クライアントは、遅延 25[ms]、帯域幅 5[Mbps] の LTE と、遅延 5[ms]、帯域幅 25[Mbps] の Wi-Fi を用いて、サーバに接続する。ここで、Mininet-Wifi では LTE のシミュレーションには対応していないため、[11] と同様に有線接続のパラメータを変更することで LTE 通信を模倣している。また、有線接続においてパケットロス率は 0% に設定されている。Wi-Fi の規

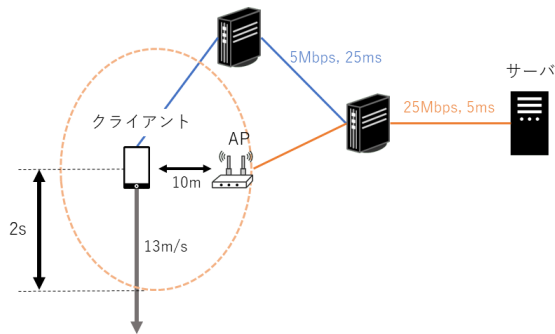


図 3 シミュレーション環境
Fig. 3 Simulation environment.

格には IEEE802.11ac を用いて、受信信号のエネルギーの閾値 T を $-91[\text{dBm}]$ とする。アクセスポイントの通信可能範囲は、伝搬損失係数 n を 3.0 とし、式 (1) に基づき $70[\text{m}]$ で設定されている。

シミュレーションが開始すると、クライアントは LTE と Wi-Fi の両方を併用して、サーバから $5[\text{MB}]$ のファイルダウンロードを開始する。同時に、クライアントは秒速 $13[\text{m}]$ で AP から $10[\text{m}]$ 離れた位置を横切るように移動し、 $[2\text{s}]$ 後に Wi-Fi の通信可能範囲外となる。クライアントは通信範囲外となるまでの時間を予め把握しており、シミュレーションが開始するとその時間から Wi-Fi を喪失する時刻を計算し、サーバに共有する。この環境でシミュレーションを 10 回実施し、その平均を評価する。

4.2 評価項目

上述のシナリオで、PLAMA と MPQUIC を比較する。比較のため、MPQUIC では ACK パケットを別の通信経路では送信しないものとする。それぞれの Wi-Fi におけるパケットロス率、通信経路ごとの平均受信スループットを比較する。ここで、平均受信スループットとは、スマートフォンが受信しその ACK パケットがサーバに到達した QUIC パケットの総バイト数を、通信時間で除したものである。特に、Wi-Fi での通信時間について、PLAMA では通信を開始してから Wi-Fi へのパケット送信を停止するまでの時間とし、MPQUIC では通信を開始してから通信経路を喪失し再送タイムアウトによる再送が発生するまでの時刻とする。

5. 結果と考察

パケットロス数の評価結果を表 1 に示す。MPQUIC では、通信経路の喪失を想定せずに Wi-Fi でのパケットの送信を継続するため、すべての InFlight パケットがロスしている。一方 PLAMA では、MPQUIC と比較してパケットロスが約 91%削減された。これは、事前に Wi-Fi でのパケットの送信を停止したことで、通信経路を喪失する時点

表 1 パケットロス数

Table 1 Number of packet loss.

	平均	標準偏差
PLAMA	3.5	8.48
MPQUIC	39.7	1.95

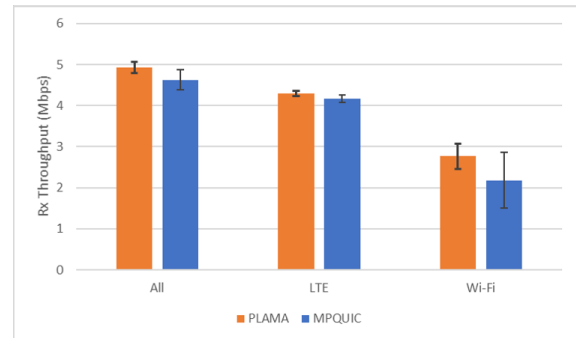


図 4 通信経路ごとの平均受信スループットの平均値
Fig. 4 Average Rx throughput per path.

での InFlight パケットの数を削減できたためだと考えられる。しかし、PLAMA でも依然としてパケットロスは発生している。これは、Wi-Fi を喪失する地点を計算する際に、電波強度が常に変動することが考慮されていないためだと考えられる。特に今回のシミュレーション環境においては、クライアントの移動に伴うフェージングによって電波強度が変動するため、計算された地点とは異なる地点で通信経路を喪失する可能性がある。これにより通信経路の喪失が予測した時刻よりも早く発生した場合に、InFlight パケットの一部がクライアントに到達できず、パケットロスが発生していると考えられる。

通信経路ごとの平均受信スループットの平均値を図 4 に示す。PLAMA と MPQUIC を比較すると、Wi-Fi では約 27%、LTE と Wi-Fi を合わせた全体としては約 6%向上している。MPQUIC では、Wi-Fi の喪失を検知し、発生したパケットロスに対する再送処理を行うためには、再送タイムアウトの発生を待つ必要がある。それまでは、Wi-Fi でのパケットの送信を停止すべきか判断できず、再送処理を行うこともできないため、受信スループットの低下に繋がっていると考えられる。一方 PLAMA では、そもそもパケットロス数が削減されていることに加え、パケットロスが発生したとしても再送タイムアウトを待つことなく、能動的に Wi-Fi でのパケットの送信を停止できる。また、LTE を通じて受け取った ACK パケットによって、より多くのパケットを Wi-Fi で正しく送信することができる。そのため、MPQUIC と比較して Wi-Fi での受信スループットの低下を抑えられたと考えられる。さらに、パケットロスが発生した場合でも、サーバは LTE を用いて ACK パケットを受け取ることができるため、MPQUIC より再送処理を早く開始することができる。そのため PLAMA で

は、Wi-Fi だけでなく全体の受信スループットも向上したと考えられる。

6. おわりに

屋外でもスマートフォンで大容量なコンテンツを扱うために、マルチパストランスポートプロトコルを用いて利用可能な帯域を増加させることが求められる。一方で、既存の研究ではスマートフォンが移動することによるパケットロスが考慮されておらず、通信の利用効率が低下する。そこで本研究では、移動によって通信経路が喪失する時刻を予測し、その通信経路での送信を事前に停止することで、パケットロスを削減する手法として PLAMA を提案した。シミュレーションによって PLAMA と MPQUIC を比較した結果、パケットロスを約 91%削減し、平均受信スループットが約 6%向上することを確認した。

参考文献

- [1] Tuyen X. Tran, Abolfazl Hajisami, Parul Pandey, and Dario Pompili. "collaborative mobile edge computing in 5g networks: New paradigms, scenarios, and challenges". *CoRR*, Vol. abs/1612.03184, , 2016.
- [2] 総務省. 総務省 | 令和 2 年版 情報通信白書 | コンテンツの大容量化. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nd131210.html>. (Accessed on 11/06/2021).
- [3] Alan Ford, Costin Raiciu, Mark J. Handley, Olivier Bonaventure, and Christoph Paasch. TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses. RFC 8684, March 2020.
- [4] Yeon-sup Lim, Yung-Chih Chen, Erich M. Nahum, Don Towsley, and Kang-Won Lee. Cross-layer path management in multi-path transport protocol for mobile devices. In *IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conference on Computer Communications*, pp. 1815–1823, 2014.
- [5] Hassan Sinky, Bechir Hamdaoui, and Mohsen Guizani. Handoff-aware cross-layer assisted multi-path tcp for proactive congestion control in mobile heterogeneous wireless networks. In *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–7, 2015.
- [6] Transmission Control Protocol. RFC 793, September 1981.
- [7] Jana Iyengar and Martin Thomson. QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport. RFC 9000, May 2021.
- [8] Quentin De Coninck and Olivier Bonaventure. Multipath quic: Design and evaluation. In *Proceedings of the 13th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*, CoNEXT '17, pp. 160–166, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [9] Ramon R. Fontes, Samira Afzal, Samuel H. B. Brito, Mateus A. S. Santos, and Christian Esteve Rothenberg. Mininet-wifi: Emulating software-defined wireless networks. In *2015 11th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, pp. 384–389, 2015.
- [10] qdeconinck/mp-quic: Please read <https://multipath-quic.org/2017/12/09/artifacts-available.html> to figure out how to setup the code. <https://github.com/>
- [11] Pengyuan Du, Qi Zhao, and Mario Gerla. A software defined multi-path traffic offloading system for heterogeneous lte-wifi networks. In *2019 IEEE 20th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*, pp. 1–9, 2019.