

## 修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻 博士前期課程		
氏名	加藤 耕平	学籍番号	2031042
論文題目	協調型自動運転における無線品質情報に基づく高信頼マルチパス通信		
要旨	<p>これまでの協調型自動運転におけるデータの信頼性を検討した研究では各レイヤーで観測できる通信遅延やパケットロスの統計的な情報に基づいて予測した無線品質に応じて、データの圧縮やデータを送信する通信路を切り替えるなど、信頼性を向上する処理を行っていた。アプリケーション層では協調型自動運転において車両の走行映像を無線通信システムを介して送信するアプリケーションが考えられる。従来手法では Adaptive Video Streaming (AVS) はアプリケーション層で観測するビデオフレームごとの End-to-End 遅延に基づいて、送信するビデオフレームの解像度を決定することで、無線品質に応じた映像品質となり遅延が増大するのを防ぐことができる。また、トランスポート層における従来手法の Multipath QUIC (MPQUIC) は複数の通信路と接続し、各通信路で測定した統計的な Round Trip Time (RTT) から車両の無線品質を予測することで、常に無線品質が良い通信路でデータ伝送を行うことができる。一方でこれらの手法は、ひとつのレイヤーのみで信頼性を確保する手法であり、レイヤー間で連携して信頼性を確保するものではないため、アプリケーション層やトランスポート層といった上位のレイヤーは車両の無線品質を予測することでデータの信頼性を確保することしかできない。そのため、車両の無線品質が構造物などの影響で局所的に劣化した場合では、予測した無線品質と車両の位置における本来の無線品質に大きな差が生じるため、遅延が増大してしまう。したがって本論文では、MAC 層において観測した統計的な無線品質情報に基づいて各レイヤーがデータの信頼性を確保するように連携して動作する高信頼通信について提案する。具体的にはトランスポート層において無線品質情報に基づいてデータを送信する通信路を決定する MPQUIC の拡張モデルを提案する。また、アプリケーション層においては無線品質情報に基づいて車両の送信するビデオフレームの解像度を変化し、低下した解像度に対して深層学習を用いた超解像により映像品質を向上する。提案手法は従来の MPQUIC や AVS と比較して遅延制約を満たし送信できるデータ数が増加し、信頼性が向上していることを示す。</p>		

電気通信大学 令和3年度 修士論文

協調型自動運転における無線品質情報に基づく  
高信頼マルチパス通信

学籍番号	2031042
氏名	加藤 耕平
所属	電気通信大学大学院 情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻
主任指導教員	須藤 克弥 助教
指導教員	藤井 威生 教授
提出日	令和4年1月28日

## 概要

これまでの協調型自動運転におけるデータの信頼性を検討した研究では各レイヤーで観測できる通信遅延やパケットロスの統計的な情報に基づいて予測した無線品質に応じてデータの圧縮やデータを送信する通信路を切り替えるなど、信頼性を向上する処理を行っていた。アプリケーション層では協調型自動運転において車両の走行映像を無線通信システムを介して送信するアプリケーションが考えられる。従来手法では Adaptive Video Streaming (AVS) はアプリケーション層で観測するビデオフレームごとの End-to-End 遅延に基づいて、送信するビデオフレームの解像度を決定することで、無線品質に応じた映像品質となり遅延が増大するのを防ぐことができる。また、トランスポート層における従来手法の Multipath QUIC (MPQUIC) は複数の通信路と接続し、各通信路で測定した統計的な Round Trip Time (RTT) から車両の無線品質を予測することで、常に無線品質が良い通信路でデータ伝送を行うことができる。一方でこれらの手法は、ひとつのレイヤーのみで信頼性を確保する手法であり、レイヤー間で連携して信頼性を確保するものではないため、アプリケーション層やトランスポート層といった上位のレイヤーは車両の無線品質を予測することでデータの信頼性を確保することしかできない。そのため、車両の無線品質が構造物などの影響で局所的に劣化した場合には、予測した無線品質と車両の位置における本来の無線品質に大きな差が生じるため、遅延が増大してしまう。したがって本論文では、MAC 層において観測した統計的な無線品質情報に基づいて各レイヤーがデータの信頼性を確保するように連携して動作する高信頼マルチパス通信について提案する。提案手法は従来手法と比較してパケットロスが発生したデータ数が低減し、信頼性が向上していることを示す。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	本論文の背景 . . . . .	1
1.2	本論文の構成 . . . . .	3
<b>第 2 章</b>	<b>協調型自動運転におけるシミュレータの開発</b>	<b>4</b>
2.1	序論 . . . . .	4
2.2	入出力部 . . . . .	5
2.3	LTE 通信の仕様 . . . . .	5
2.4	WiFi 通信の仕様 . . . . .	9
2.4.1	MIMO, OFDM, チャンネルボンディング . . . . .	10
2.4.2	CSMA/CA 方式 . . . . .	12
2.5	結論 . . . . .	14
<b>第 3 章</b>	<b>高信頼マルチパス通信</b>	<b>15</b>
3.1	序論 . . . . .	15
3.2	トランスポート層における従来手法 . . . . .	15
3.2.1	QUIC . . . . .	15
3.2.2	MPQUIC . . . . .	16
3.3	MPQUIC の機能拡張 . . . . .	20
3.3.1	システムモデル . . . . .	20
3.3.2	受信電力の予測 . . . . .	20
3.3.3	使用通信路の選択 . . . . .	21
3.4	性能評価 . . . . .	24
3.4.1	シミュレーション環境 . . . . .	24
3.4.2	従来のマルチパス通信の実装 . . . . .	26

3.4.3	シミュレーション結果 . . . . .	26
3.5	結論 . . . . .	31
<b>第 4 章</b>	<b>高信頼映像伝送</b>	<b>32</b>
4.1	序論 . . . . .	32
4.2	基地局介入型映像伝送 . . . . .	33
4.2.1	システムモデル . . . . .	33
4.2.2	電波マップを用いた QoS の予測 . . . . .	34
4.2.3	解像度の決定方法 . . . . .	34
4.3	超解像モデル . . . . .	35
4.4	性能評価 . . . . .	37
4.4.1	シミュレーションの諸元 . . . . .	37
4.4.2	評価指標 . . . . .	38
4.4.3	従来手法の実装 . . . . .	39
4.4.4	シミュレーション結果 . . . . .	40
4.5	結論 . . . . .	43
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>44</b>
	<b>謝辞</b>	<b>46</b>
<b>付録 A</b>	<b>超解像モデルの学習と性能</b>	<b>47</b>
A.1	序論 . . . . .	47
A.2	超解像モデルの学習 . . . . .	47
A.3	超解像モデルの性能評価 . . . . .	48
A.4	結論 . . . . .	49
	<b>参考文献</b>	<b>50</b>
	<b>発表文献リスト</b>	<b>54</b>

# 表目次

2.1	3GPP によって定められた標準的な CQI 表 [1] . . . . .	9
2.2	WiFi 規格 . . . . .	9
2.3	Wireless Lan Professional による IEEE802.11n における標準的な MCS 表 [2] . . . . .	11
2.4	CSMA/CA におけるパラメータ . . . . .	12
3.1	シミュレーションの諸元 . . . . .	25
3.2	ping の生成周期とデータサイズ . . . . .	26
3.3	インターネット遅延の変化におけるパケットロス率 (従来手法) . . . . .	30
3.4	インターネット遅延の変化におけるパケットロス率 (提案手法) . . . . .	30
4.1	シミュレーションの諸元 . . . . .	37
4.2	各車両における時間平均の EPSNR と周波数帯域幅 . . . . .	43
A.1	処理遅延と画像品質 (PSNR) . . . . .	48

# 目次

1.1	本論文で提案する各層における機能 [3]	2
2.1	シミュレータ概要図	5
2.2	モード 6 における TDD フレーム [4]	6
2.3	OFDM 方式と SC-FDMA 方式における送信信号帯域幅の違い. OFDM は RB が周波数軸において離れていても RB 単位でデータを割り当てることが可能なため, 送信信号帯域幅が大きくなってしまう. 電波環境を推定するために必要な消費電力は信号帯域幅に比例して小さくなる.	7
2.4	アップリンク通信, ダウンリンク通信における RB に割り当てられた機能. LTE ではアップリンクとダウンリンクでそれぞれ RB の役割が異なっている.	7
2.5	MIMO におけるアンテナの物理構成	10
2.6	CSMA/CA におけるデータ送信プロセス	12
2.7	IEEE802.11n におけるフレーム構成. データは A-MPDU に細分化して送信できる. また, A-MPDU はさらに MPDU に細分化できるが, これは再送時に用いる.	14
3.1	HTTP/2.0 と HTTP/3.0 のプロトコル階層	16
3.2	HTTP/2.0 と HTTP/3.0 におけるハンドシェイク. syn はシーケンス番号を示し, ack はシーケンスに対する返答を示し, ClientHello はクライアントの公開鍵, ServerHello はサーバーの公開鍵を示している.	17
3.3	マルチパス QUIC におけるプロトコル階層	18
3.4	MPQUIC における標準的なパケットフォーマット [5]	18
3.5	提案するシステムモデル	21
3.6	シミュレーションにおける各車両の SNR	25

3.7	各車両における ping の RTT (従来手法) . . . . .	27
3.8	各車両における各通信路のパケットロス発生確率 (提案手法) . . . . .	27
3.9	各車両における通信遅延. 従来手法では無線品質が劣化した場合, パケッ トロスが発生するが, 提案手法ではほとんどのデータを送信できる. . .	28
4.1	基地局介入型映像伝送手法におけるシステム構成図 . . . . .	33
4.2	基地局介入型映像伝送手法において用いる超解像モデル [6]. . . . .	36
4.3	車両が走行することによって得られる SNR . . . . .	38
4.4	従来手法と提案手法における各車両の周波数帯域幅 . . . . .	40
4.5	ビデオフレームごとの各手法における EPSNR. 従来手法では SNR の低 い車両は遅延制約を満たすことができていない. 提案手法では QoS を予 測することによって全ての車両がほとんどのビデオフレームが遅延制約 を満たすことができる. . . . .	41
A.1	超解像の例. 提案したモデルの出力はオリジナルの超解像モデルと似た フレームを出力できている. . . . .	48

# 第1章

## 序論

### 1.1 本論文の背景

人が操作に介入しない車両の自動運転システムは、車両が搭載されたセンサやカメラを用いて自律走行を行うことでヒューマンエラーによる交通事故を低減することができる [7–9]. しかしながら、センサの範囲外の情報は取得できず、市街地における交差点などの見通しが悪い場所では、自律走行車の判断が遅れ交通事故が発生してしまう [10–12].

そのため、自律走行車がセンサやカメラを用いて収集した情報を周囲の機器と無線ネットワークを介して共有することで、車両が連携して走行する協調型自動運転が開発されている [13–16]. 協調型自動運転は LTE や 5G, WiFi といった無線通信システムを介して、道路に設置されている路側機や周囲の車両に情報を共有することで、ほかの自律走行車と連携し見通し外地点においても安全性を確保することができる [17–19].

一方で、協調型自動運転には遅延制約が厳しいという課題がある [20–22]. これは車両から路側機に収集された情報の遅延が大きい場合、自律走行車はその古い情報に基づいて走行を行うため、危機的状況や交通状況などを示す重要な情報の共有が行われず、交通事故が発生してしまう可能性があるためである. そのため、協調型自動運転では遅延制約を超過せず、対象にデータ伝送可能な信頼性が確保された通信手法が必要となる.

これまで信頼性を確保したデータ伝送を実現するために複数のレイヤーで様々な研究が行われている. トランスポート層においては、データ伝送に複数の通信路を利用することで信頼性を向上している [23–25]. 複数の通信路を利用する従来手法のほとんどは MPTCP [26] や MPQUIC [27] に基づいた手法である. 具体的には、データを送信するユーザーが WiFi, LTE といった複数の通信路に接続し、各通信路において測定した Round Trip Time (RTT) の統計的な値より、ユーザーの現在の各通信路における無線品

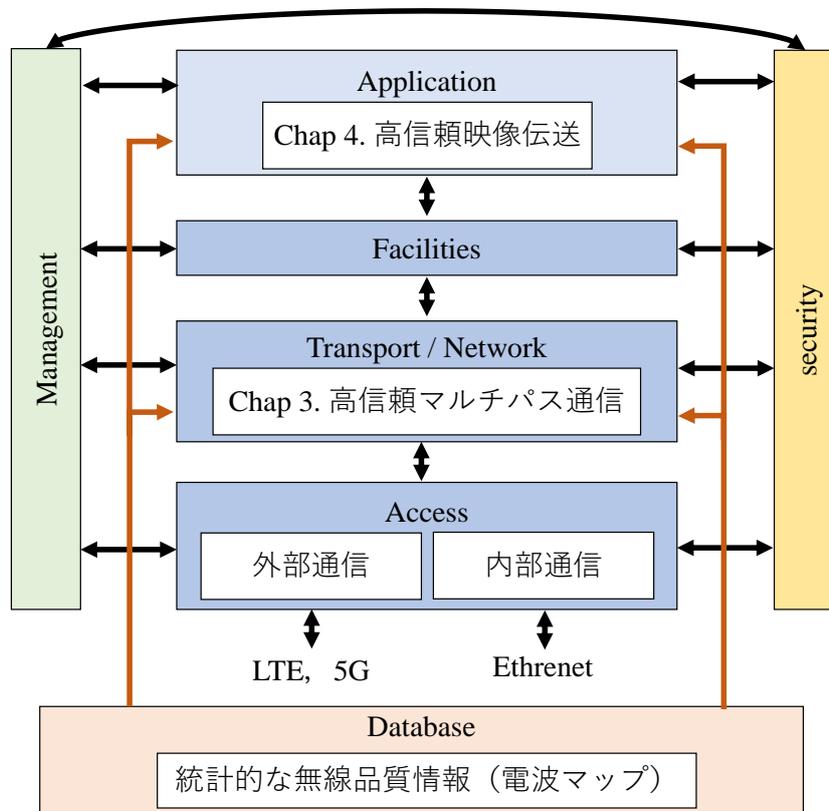


図 1.1: 本論文で提案する各層における機能 [3]

質を予測することでデータを伝送する通信路を決定する．そのため従来手法では，一方の無線システムにおいて無線品質が悪化したとしても，もう一方の無線品質が良好な通信路に柔軟に切り替えることができるため，シングルパスと比較して信頼性が向上する．またアプリケーション層においては，送信するデータ量を無線品質に応じて変更することで遅延とパケットロスを低減する手法がある [28–30]．車両が無線通信を介して走行映像を伝送するアプリケーションにおける従来手法では，ビデオフレームの End-to-End 遅延より予測した車両の無線品質に基づいて，送信するビデオフレームのビットレートを制御することで，ビデオフレームの伝送遅延を一定以下に保つ Adaptive video streaming (AVS) に基づいている．固定のビデオエンコーディングを用いる手法に対して，遅延を一定に保つことが可能であり，遅延が増大することによってアプリケーションの遅延制約を超過するパケットロスを防ぐことができるため信頼性が向上する．

しかしながら，これらの手法はプロトコル階層におけるひとつのレイヤーのみで信頼性を確保する手法であり，レイヤー間で連携して信頼性を確保するものではない．したがっ

て、アプリケーション層やトランスポート層といった上位のレイヤーにおいては車両の現在の無線品質情報を取得できず過去の統計的な情報に基づいて現在の無線品質を予測することでデータの信頼性を確保することしかできない。車両の無線品質が構造物などの影響で局所的に劣化する環境では、上位レイヤーにおいて予測した無線品質と実際の無線品質に大きな差が生じ、データ伝送の遅延が増大する。

したがって本論文では、MAC 層において観測した統計的な無線品質情報 [31] に基づいて各レイヤーがデータの信頼性を確保するように連携して動作する高信頼マルチパス通信について提案する。

## 1.2 本論文の構成

本論文では、無線品質情報に基づいた信頼性を向上したマルチパス通信について検討を行う。本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、従来の信頼性向上手法について概要を示しつつ、本論文の目的を説明した。

第 2 章では、協調型自動運転におけるシミュレータについて従来のシミュレータについて問題点を明らかにし、新たに作成したシミュレータについて説明する。

第 3 章では、図 1.1 におけるトランスポート層に対するアプローチを説明する。従来の MPQUIC について仕様の詳細と、無線品質情報に基づいて通信路を選択する機能を拡張した MPQUIC について提案する。さらに、性能評価では車両の無線品質が局所的に劣化した環境を想定し、協調型自動運転シミュレータを用いてパケットロス数について評価する。

第 4 章では、図 1.1 におけるアプリケーション層に対するアプローチを説明する。車両が走行映像を伝送するアプリケーションを想定し、従来の AVS と提案する無線品質情報に基づいて解像度を決定する基地局介入型映像伝送手法について詳細を説明する。さらに性能評価では、実観測データセットを利用し、提案手法が既存手法と比較して遅延制約を満たしビデオフレームを送信できていることを示す。

第 5 章では、本論文の結論を述べる。

## 第 2 章

# 協調型自動運転におけるシミュレータの開発

### 2.1 序論

本章では協調型自動運転において車両がデータを周期的に送信するためのシミュレータについて説明する。これまでのマルチパス無線通信のシミュレータでは自由空間電波伝搬モデルや二値空間電波伝搬モデルなどの簡易的な電波伝搬特性を利用することを前提として動作しており、任意の電波環境を入力することはできない [32–34]。そのため、これまでのシミュレータでは提案手法において検証する局所的な無線品質の劣化によるマルチパス通信の影響を調査することは困難である。従って本章では任意の電波環境を入力とした、WiFi, LTE 回線を用いたマルチパス通信を行うシミュレータを作成し、その詳細を説明する。具体的には、複数の車両、基地局、路側機で構成された無線ネットワークを想定し、遅延解析ソフトウェアである MATLAB を用いて車両-基地局間の LTE アップリンク通信 [35–37] と車両-路側機間 WiFi アップリンク通信 [38–40] に基づいてシミュレータを作成する。

シミュレータは図 2.1 に示すシミュレータ構造のように、データベースより入力する各車両の無線品質、3.3 節で紹介するトランスポート層の仕様、そこから決定した WiFi, LTE の各通信路にデータを伝送する。電波環境を入力された車両は RTT や電波環境の情報をもとにトランスポート層によってデータを送信する通信路を決定し、その後指定された通信路の仕様に従ってデータを路側機へ送信する。シミュレータの制御周期は 0.01 msec であり、LTE, WiFi の制御を緻密に行うことが可能である。

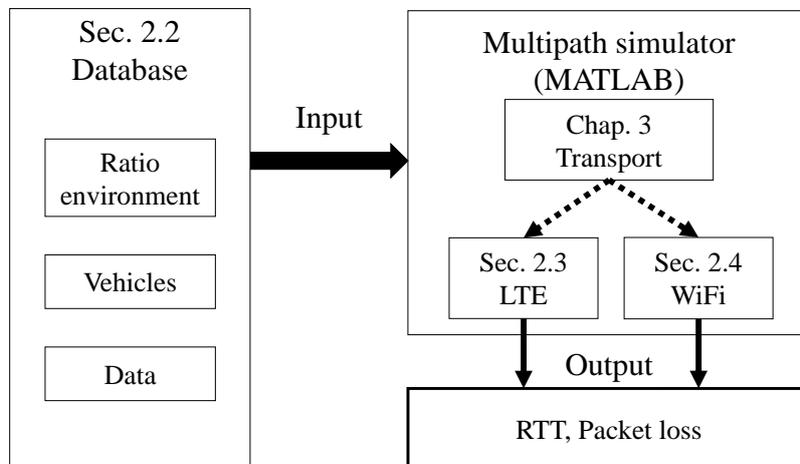


図 2.1: シミュレータ概要図

## 2.2 入出力部

シミュレータには入力に車両の電波環境  $R$ 、車両数  $n$ 、車両が生成するデータ量  $\gamma$  を入力することができる。電波環境の入力には、2つの方法がある。ひとつは既存の電波伝搬モデルから所望の電波環境を作成する方法である。この方法では、例えば自由空間電波伝搬モデルに基づいて受信電力が距離減衰する上で、車両が任意の距離を走行後に無線品質が局所的に劣化する電波環境を作製できる。もうひとつは実際に測定した受信電力の値を電波環境として入力することができる。しかし、その際はシミュレータの制御周期は  $0.01 \text{ msec}$  であるため、測定値を入力する場合はシミュレータの制御周期を考慮し詳細に入力する必要がある。入力する車両の数は変数であり、任意の車両数を入力することが可能である。車両が送信するデータ量やデータの生成周期は変数であり、映像や車両の測定情報など、車両が利用するアプリケーションに応じて変化させることが可能となる。出力では車両ごとの RTT、また遅延制約を設けることで RTT が遅延制約を超過しパケットロスしたデータ数を出力することができる。

## 2.3 LTE 通信の仕様

シミュレータでは車両が基地局と通信を行う場合、広範囲で安定して通信を行える LTE 通信を用いる。LTE 回線はアップリンク、ダウンリンクともに Time Division Multiple

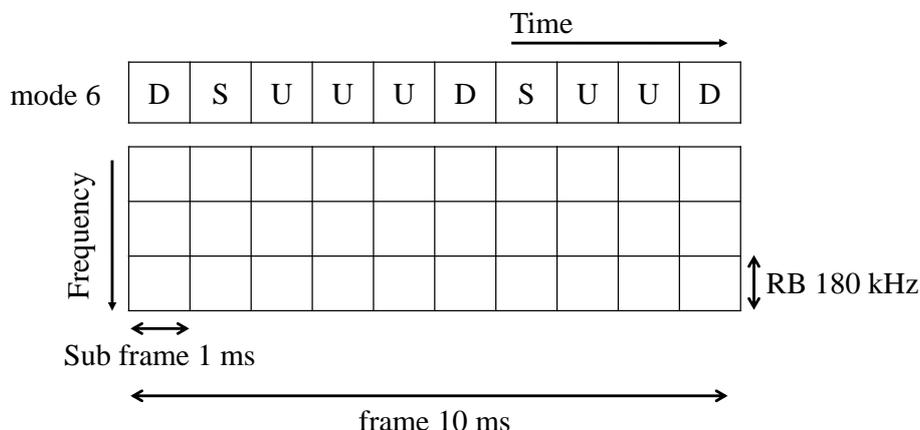


図 2.2: モード 6 における TDD フレーム [4]

Access (TDMA) 方式によって管理されてる [35]. 具体的には, OFDM によって周波数軸に分割された最小周波数単位であるサブキャリアと, 時間軸に分割された最小時間単位である OFDM シンボルによって管理されており, 車両には 7 個の OFDM シンボルと 12 個のサブキャリアによって構成される Resource Block (RB) 単位で周波数, 時間を割り当てている. ここで, LTE のサブキャリアは 15 kHz であり, RB の周波数帯域幅は 180 kHz となる. また, 7 個の OFDM シンボルは 0.5 msec のタイムスロット長で構成されている. 車両にはタイムスロット長が 1 msec であるサブフレームごとに RB を割り当てている. つまり, RB は時間軸に連続して 2 個ずつ割り当てられている. LTE は事前にアップリンクまたはダウンリンクに利用するサブフレームを決定している. これは 10 個のサブフレームで構成されるタイムスロット長が 10 msec であるフレームを周期的に繰り返すことで, アップリンクに帯域を利用する時間, ダウンリンクに帯域を利用する時間と分別している. 具体的にはモードと呼ばれる周期を採用しており, 図 2.2 のようにサブフレームごとにアップリンク U, ダウンリンク D を利用する時間が分かれている. また, ここで S は, Super Sub Frame と呼び, ACK やデータ伝送のための処理に要するマージンを示している.

LTE におけるアップリンク通信は端末の電力が限られていることから, 送信に必要な消費電力が小さいことが求められる. よって OFDM 方式を用いたダウンリンク通信のように RB 毎でデータを送信するとした時, 図 2.3 のように送信信号帯域幅が増加することで各サブキャリアの信号が小さくなる. よって, 基地局は無線電波環境を推定するために基地局において各サブキャリアの信号をパワー・アンプを用いて増大する必要がある

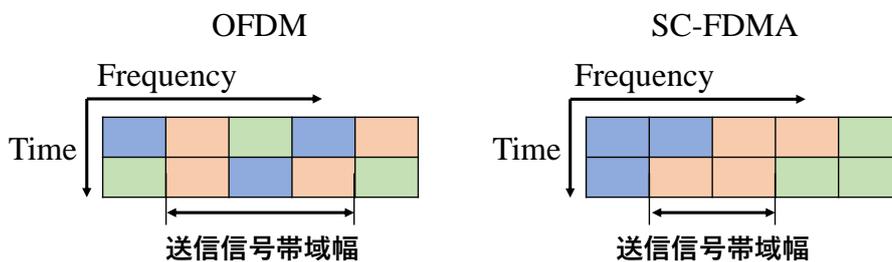


図 2.3: OFDM 方式と SC-FDMA 方式における送信信号帯域幅の違い. OFDM は RB が周波数軸において離れていても RB 単位でデータを割り当てるのが可能なため、送信信号帯域幅が大きくなってしまふ. 電波環境を推定するために必要な消費電力は信号帯域幅に比例して小さくなる.

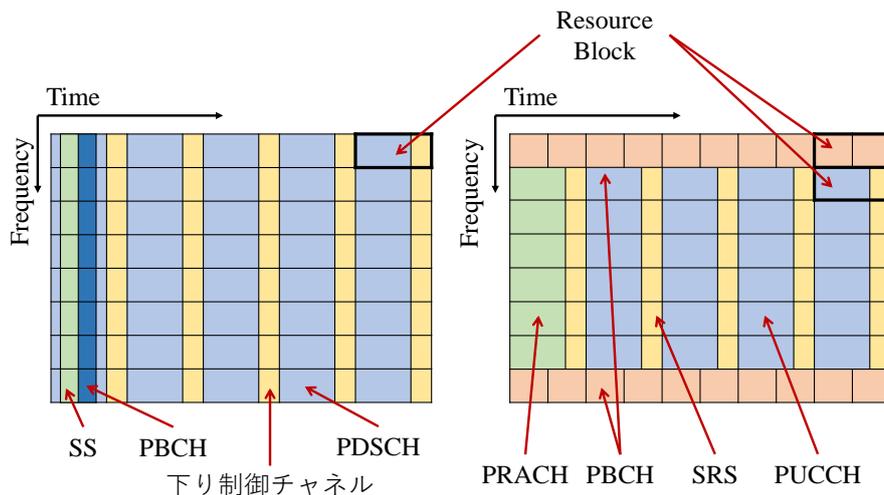


図 2.4: アップリンク通信, ダウンリンク通信における RB に割り当てられた機能. LTE ではアップリンクとダウンリンクでそれぞれ RB の役割が異なっている.

る. この時用いるパワー・アンプは、線形性と歪みが低いことが求められるが、一般に線形性が高いパワー・アンプは消費電力が高くなる問題があり、送信電力が限られているアップリンク通信においては利用できない. したがって、LTE のアップリンク通信では Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) が用いられている. SC-FDMA はシングルキャリアであるためアップリンク通信においては車両に帯域幅を割り当てる場合は周波数軸に連続になるように RB を割り当てるため、送信信号帯域幅が小さくなる.

また、LTE 通信でアップリンク通信、ダウンリンク通信において RB に割り当てられる機能が異なっている。図 2.4 にアップリンク、ダウンリンクにおけるシステム図を示す。図 2.4 において定義されている機能を以下に示す。

SS

基地局に接続する車両のモード切替タイミングを同期に利用

PBCH

基地局の帯域幅やアンテナ数などの最低限の情報を送信するために利用

下り制御チャンネル

アップリンク通信に対する ACK や、帯域幅の割当など下りリンクの品質を測定するために利用

PDSCH

ダウンリンク通信におけるデータ送信に利用

PUCCH

ダウンリンク通信に対する ACK に利用

PRACH

初期アクセスやハンドオーバーによるコネクション確立や同期を行う際に利用

PUSCH

アップリンク通認におけるデータ送信に利用

アップリンク通信は同じタイムスロットにあるいくつかの RB がデータ伝送に使用されず、データの制御やチャンネル制御に ACK 送信用に割り当てられている。従って、アップリンク通信で送信したデータに対する ACK はダウンリンク通信時にのみ返すことができるため、図 2.2 に示すモードによりダウンリンク通信に切り替わるまで待機する必要がある。また、アップリンク通信ではいくつかの RB が ACK 専用として完全に独立しているため、データ送信用に用意する RB はシミュレータにおいて、基地局の周波数帯域が  $f$  としたとき以下のように定義している。

$$RB = \frac{9}{10} \frac{f}{180 \times 10^3} - 2. \quad (2.1)$$

その後、基地局は RB から無線ネットワーク内の各車両に対して  $RB_v$  を割り当てる。シミュレータではデータを生成した車両に対して  $RB_v$  が平等となるように割り当てている。車両は割り当てられた  $RB_v$  により帯域が決定するため、アップリンクのデータレートを導出する。データレートの導出では、表 2.1 のように 3GPP で定義されているアップリンクの CQI 表を用いる。CQI 表は車両の無線品質を示す Signal-to-Noise Ratio

表 2.1: 3GPP によって定められた標準的な CQI 表 [1]

SNR threshold [dB]	modulation	code rate $\times 1024$	$\epsilon$ [bps/Hz]
0.95	QPSK	193	0.3770
2.95	QPSK	308	0.6016
4.90	QPSK	449	0.8770
7.39	QPSK	602	1.1758
8.898	16QAM	378	1.4766
11.02	16QAM	490	1.9141
13.32	16QAM	616	2.4063
14.68	64QAM	466	2.7305
16.62	64QAM	567	3.3223
18.91	64QAM	666	3.9023
21.58	64QAM	772	4.5234
24.88	64QAM	873	5.1152
29.32	64QAM	948	5.55478

(SNR) より変調方式や周波数効率  $\epsilon$  を決定することができる。車両の SNR が  $\eta_v$  である場合、ダウンリンクのデータレート  $d_v$  は以下の式のように示すことができる。

$$d_v = 180 \times 10^3 \times \text{RB}_v \times \epsilon(\eta_v). \quad (2.2)$$

ここで、 $\epsilon$  は CQI 表より決まる周波数利用効率を示している。

## 2.4 WiFi 通信の仕様

表 2.2: WiFi 規格

規格	周波数帯域	最大通信速度
IEEE 802.11g	2.4 GHz	54 Mbps
IEEE 802.11n	2.4 GHz	600 Mbps
IEEE 802.11ac	5 GHz	6.9 Gbps

アクセスポイントでは WiFi のインフラストラクチャモードを利用する。WiFi は表

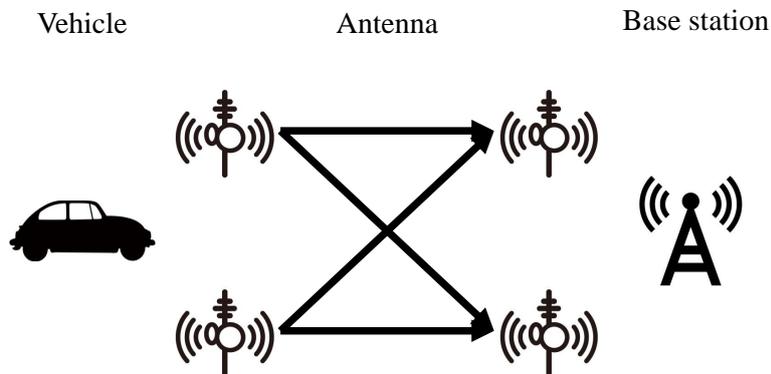


図 2.5: MIMO におけるアンテナの物理構成

2.2 で示すように様々な規格が存在するが，提案手法においては市街地で用いられることから 2.4GHz 帯域に対応し高いスループットが期待できる IEEE802.11n を採用している．IEEE802.11n の主な技術要素は以下の通りである．

- Massive MIMO による  $4 \times 4$  ストリーミングの高速通信
- OFDM とチャンネルボンディングによるデータレートの向上
- Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) 方式を用いた衝突回避

これらの機能はアップリンク，ダウンリンクにおいても共通で用いられており，どちらの送信においても高いスループットが期待できる．以降の節では技術要素の説明を行う．

#### 2.4.1 MIMO, OFDM, チャンネルボンディング

MIMO は送信側，受信側でそれぞれアンテナを複数利用し，各アンテナで異なるデータを送受信することで通信速度をアンテナ数倍にすることができる技術である．具体的には図 2.5 のように送信機で 2 本，受信機で 2 本のアンテナを用いた場合，通信速度は 1 本のアンテナのみを利用するときと比較し 2 倍になる．シミュレータにおいてはアンテナ数は送信機，受信機 4 本利用することを想定している．

OFDM は一つの周波数帯域を複数のサブキャリアに分割し，さらにそれらのサブキャリアをそれぞれ位相が直行するように配置することで，サブキャリア単位でデータを送信するときに干渉を抑えながら，シングルキャリアの回線容量と比較し回線容量を増大する

表 2.3: Wireless Lan Professional による IEEE802.11n における標準的な MCS 表 [2]

SNR threshold [dB]	modulation $m$	coding $c$
2.0	BPSK	1/2
5.0	QPSK	1/2
9.0	QPSK	3/4
11.0	16QAM	1/2
15.0	16QAM	3/4
18.0	64QAM	2/3
20.0	64QAM	3/4
25.0	64QAM	5/6

ことができる。IEEE802.11n においては、サブキャリア周波数が 312.5 kHz であるため、ひとつのチャンネルが 20 MHz としたときサブキャリアを 52 個設定することができる。このとき単純に 20 MHz を 312.5 kHz で分割した場合、63 個のサブキャリアが形成されることとなるが、いくつかのサブキャリアは主にチャンネル間の干渉を防ぐことや、マルチパスフェージングの影響を緩和するためのゼロサブキャリアとして消費され、データの送信には利用されない。また、312.5 kHz のうち 1/5 の周波数は信号の重複を防ぐために利用されるため、データ送信に利用することができるのは 250 kHz となる。

また IEEE802.11n ではチャンネルボンディング機能を利用している。チャンネルボンディングは隣接したチャンネルを統合して 1 つのチャンネルとして利用することでサブキャリアの数を増やすことができる。利点として、単純にサブキャリア数が増えることでデータレートの向上が見込めるほか、単純に 2 つのチャンネルを利用するときと比較してゼロサブキャリア数を減らすことができる。例として、チャンネルボンディングにより 40 MHz のチャンネルを利用する場合、サブキャリアは 108 個になり、20 MHz 利用時と比較し 2 倍以上となる。

WiFi におけるデータレートの導出には車両の SNR より定的に変調方式や符号化率を決定できる Wireless Lan Professional が制定する MCS 表を用いる。表 2.3 に示す MCS 表に基づいて車両の SNR $\eta$  からデータレート  $d$  を導出する式は以下ようになる。

$$d = m(\eta_v) \times c(\eta_v) \times 108 \times 250 \times 10^3 \times 4. \quad (2.3)$$

ここで、 $m$  は MCS 表より決定した変調方式による 1 シンボルに送信可能なビット数、 $c$  は MCS 表より決まる符号化率を示している。 $\times 250 \times 10^3$  はサブキャリアにおけるデー

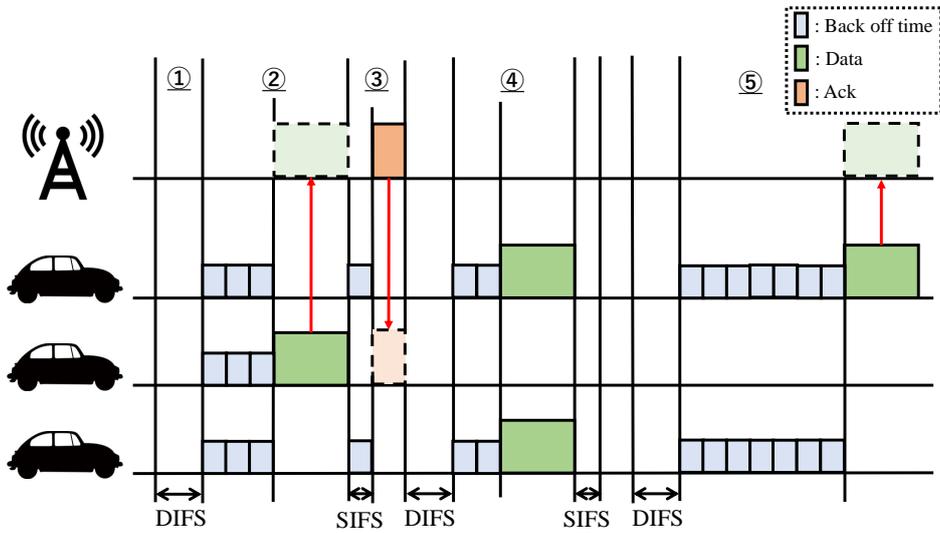


図 2.6: CSMA/CA におけるデータ送信プロセス

データ送信に利用可能な周波数帯域幅を示している。

## 2.4.2 CSMA/CA 方式

WiFi は 1 台の車両が回線全てを占有し、各車両がそれぞれデータを送信する。そのため複数の車両が一斉にデータを送信すると、他車両の送信中に送信すると回線中でデータ衝突が発生し、パケットロスになる。そのため IEEE802.11n ではデータの衝突を回避するシステムとして CSMA/CA が組み込まれている。この方式では、車両がデータを生成したとき、キャリアアセスンスにより通信路の使用状況を確認し、ほかにデータを送信している車両が存在しない場合にのみデータを送信する手法である。

表 2.4: CSMA/CA におけるパラメータ

Max backoff time	0.5 msec
DIFS	0.04 msec
SIFS	0.01 msec

具体的に、図 2.6 のように動作する。以下にプロセスの説明を行う。

1. データが生成された車両は固定の待ち時間である DIFS を消費
2. 車両はバックオフ時間を消費する。消費後データを送信する。

3. 路側機は車両から送信されたデータを受信後、ACK を車両に送信するために SIFS を消費する。SIFS を消費後、路側機は車両に ACK を返答する。
4. バックオフ時間が複数のユーザーで同時に消費が終わった場合データの衝突が発生し、データは路側機に届かないためパケットロスとなる。
5. 車両は一定時間 ACK が返ってこない場合に再度 DIFS とバックオフ時間を設け再送を行う。

ここで DCF Interframe Space (DIFS), Short Interframe Space (SIFS) はデータや AC を送信するための処理時間であるほかに、データの優先度を示している。CSMA/CA 方式では ACK の送信がデータの送信よりも優先度が高いため SIFS は DIFS と比べ低くする必要がある。シミュレータにおいては表 2.4 のように設定している。またバックオフ時間に関しては最大値を 500 $\mu$ sec と定義し、一様乱数によってランダムに値を設定する。

CSMA/CA 方式ではデータ衝突による再送を行う際にバックオフ時間を再度設定するが、その値は一様乱数ではなく以下の式で設定する。

$$\text{Backoff time} = 2^{5+i} * \text{rand}() - 1, \quad (2.4)$$

$i$  は衝突回数を示し、 $\text{rand}()$  は  $[0,1]$  の範囲の一様乱数である。これは、データの衝突が発生することはネットワーク内が混雑していることを示すため、混雑時を回避しデータの再衝突を防ぐためバックオフ時間は通常よりも長く取得する必要があるためである [38]。

また、WiFi では生成されたデータをいくつかのデータに分割し、それぞれにバックオフ時間を設け送信を行う。これは、全てのデータを送信した際にデータの衝突が発生した場合、その全てのデータを再送するためスループットが大幅に低下してしまうことを防ぐためである。図 2.7 のように、IEEE802.11n においてはデータを A-MPDU と呼ばれる最大 64kbyte のデータに分割する。送信時に A-MPDU 毎にバックオフ時間の設定といったデータの送信処理を行い、ACK においても A-MPDU 毎に返している [41, 42]。また、A-MPDU は MPDU と呼ばれる最大 1600 byte のデータにさらに細分化することができる。この MPDU は再送時に利用しており、具体的には A-MPDU の送信に対する ACK は A-MPDU 内の MPDU 全ての ACK をまとめて送信しているため、IEEE802.11n では MPDU 単位でデータの再送が可能となっている。

例えば、図 2.7 のように A-MPDU 単位でデータを送信するとき、A-MPDU 内で一部パケットロスが発生した際、宛先ユーザーが送信する ACK はパケットロスが発生した MPDU を除いたものになる。従って、送信元ユーザーは ACK が無い MPDU のみを再度送信することができ、再送に要する時間を減らすことでスループットを向上している。

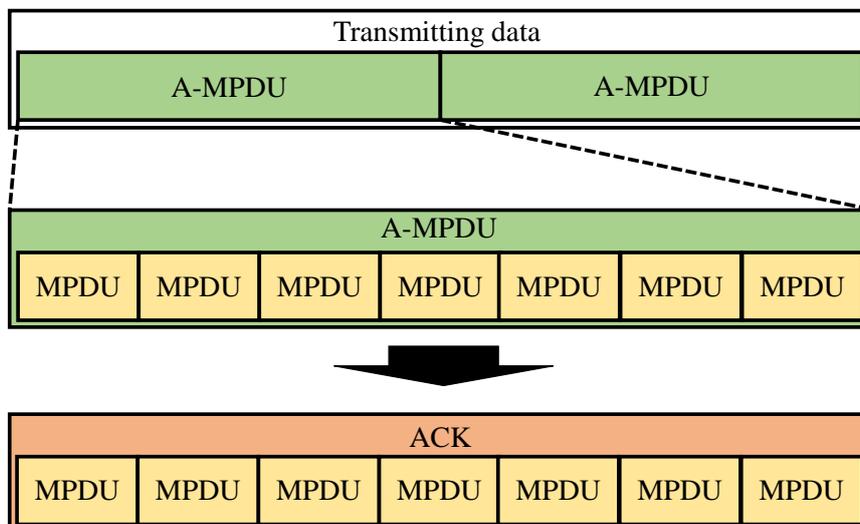


図 2.7: IEEE802.11n におけるフレーム構成. データは A-MPDU に細分化して送信できる. また, A-MPDU はさらに MPDU に細分化できるが, これは再送時に用いる.

## 2.5 結論

本章では協調型自動運転における車両が路側機に LTE 回線, WiFi 回線を用いて周期的にデータを送信するためのシミュレータについて説明した. これまでのマルチパス通信のシミュレータが自由空間電波伝搬モデルなどの簡易的な電波特性を利用することを前提としていたため, 任意の電波環境に対するシミュレーションが困難である課題に対し, 任意の電波環境や車両数, 送信するデータ量を入力することができるマルチパスシミュレータを作成した. シミュレータでは車両-基地局間の LTE アップリンク通信と WiFi におけるアップリンク通信, 3 章で説明する MPQUCI に基づいて車両がデータを送信し, データの通信遅延やパケットロスを出力することができる.

## 第3章

# 高信頼マルチパス通信

### 3.1 序論

本章では HTTP/3.0 において新しく決定されたトランスポートプロトコルである QUIC をマルチパスに拡張すること信頼性を向上した Multipath QUIC (MPQUIC) について 2021 年の段階で決定されている仕様を説明し、その後無線品質情報に基づく機能を拡張した MPQUIC について説明する。最後に従来手法と比較して提案手法が信頼性において優れていることを示す。

### 3.2 トランスポート層における従来手法

本節では 2021 年の時点で決定されている MPQUIC の仕様を説明し、その課題を明らかにする [27, 43]。

#### 3.2.1 QUIC

初めに QUIC [23] について特徴を説明し、その後 MPQUIC について説明を行う。QUIC は HTTP/3.0 より実装予定の UDP を利用した新しいトランスポートプロトコルである。図 3.1 に HTTP/3.0 におけるプロトコル階層と比較のために HTTP/2.0 におけるプロトコル階層を示す。QUIC はトランスポートプロトコルではあるが、図 3.1 のようにアプリケーション層にも機能が及んでいる。これは、QUIC が HTTP/2.0 におけるアプリケーション層の機能の一つである Transport Layer Security 1.3(TLS1.3) をトランスポートプロトコルの機能として組み込んでいるためである。サーバーとクライアント間の往復のやり取りを 1-RTT とすると、図 3.2(a) に示すように、HTTP/2.0 は通信路

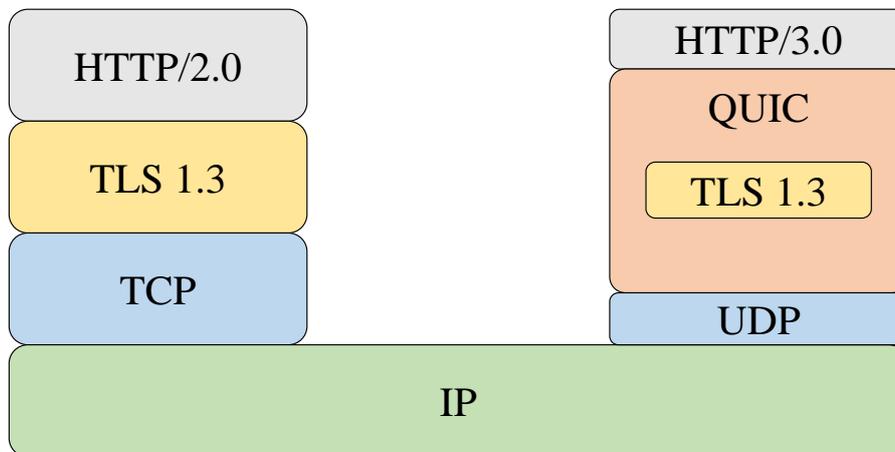


図 3.1: HTTP/2.0 と HTTP/3.0 のプロトコル階層

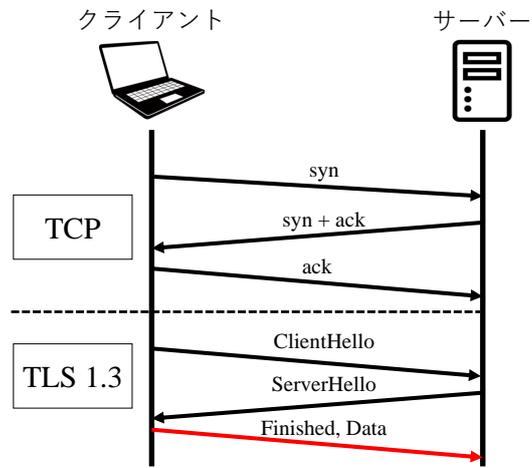
の接続に TLS, TCP で合計 3-RTT 必要である。それに対して図 3.2(b) に示すように, QUIC を用いた HTTP/3.0 は 1-RTT のみで接続が可能となっている。これは TLS1.3 の機能を QUIC に含めることで TLS の認証を利用してトランスポートプロトコルの認証も同時に行うことで, 接続の高速化を行っている。また, 1 度接続した通信路であるならば, 接続するための認証情報をキャッシュしておくことで, 0-RTT の接続も可能である。また, UDP を用いることを前提としているため HTTP/2.0 において TCP を用いることで発生していた, パケットロスが発生した場合アプリケーションの処理が止まってしまう, Head of Line (HoL) ブロッキングが解消されている。

### 3.2.2 MPQUIC

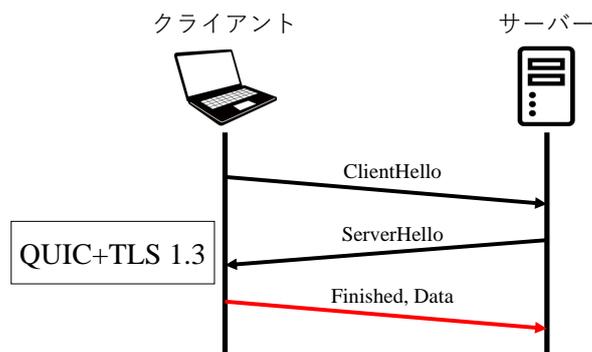
MPQUIC は QUIC の機能を保持しながらマルチパス機能を拡張したトランスポートプロトコルである。MPQUIC では複数の通信路を利用しデータを送信する。具体的には利用する通信路が通信障害の影響で一方の無線システムにおける無線品質が悪化した場合, すぐにもう一方の無線システムに切り替えることでアプリケーションを利用するユーザーへの影響を最小限に抑えることができる。

MPQUIC のプロトコル階層を図 3.3 に示す。MPQUIC はパスマネジメント機能, パケットスケジューリング機能の 2 つの機能が追加されており, これらの機能によりデータを送信するパスを決定している。

パスマネジメント機能では図 3.2(b) の QUIC における通信路接続の確立フローと同様



(a) TCP+TLS におけるハンドシェイク



(b) QUIC におけるハンドシェイク

図 3.2: HTTP/2.0 と HTTP/3.0 におけるハンドシェイク. syn はシーケンス番号を示し, ack はシーケンスに対する返答を示し, ClientHello はクライアントの公開鍵, ServerHello はサーバーの公開鍵を示している.

に 1-RTT による通信路の接続を行い, また通信路の無線品質が悪化している通信路や長時間利用せずにチャンネルを占有している通信路に対して通信路を切断する要求を行う. またパスマネジメント機能では通信路の接続が完了した後にパス ID と呼ばれる接続している通信路を明示的に分別する識別番号を割り当てており, 図 3.4 示すように MPQUIC では標準的なパケットフォーマットとしてパケットにパス ID が含まれることとなる. クライアントが送信した通信路がパス ID により明示的にわかっているため, サーバーは

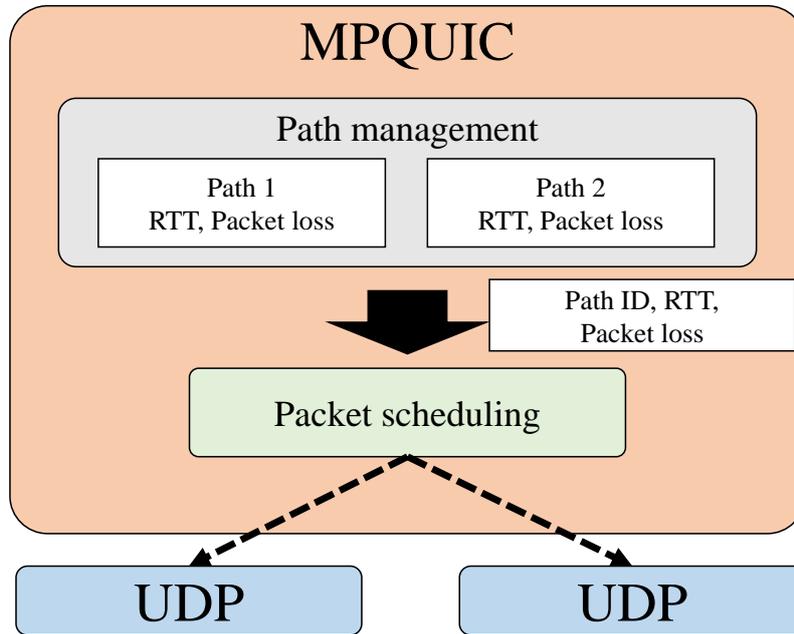


図 3.3: マルチパス QUIC におけるプロトコル階層

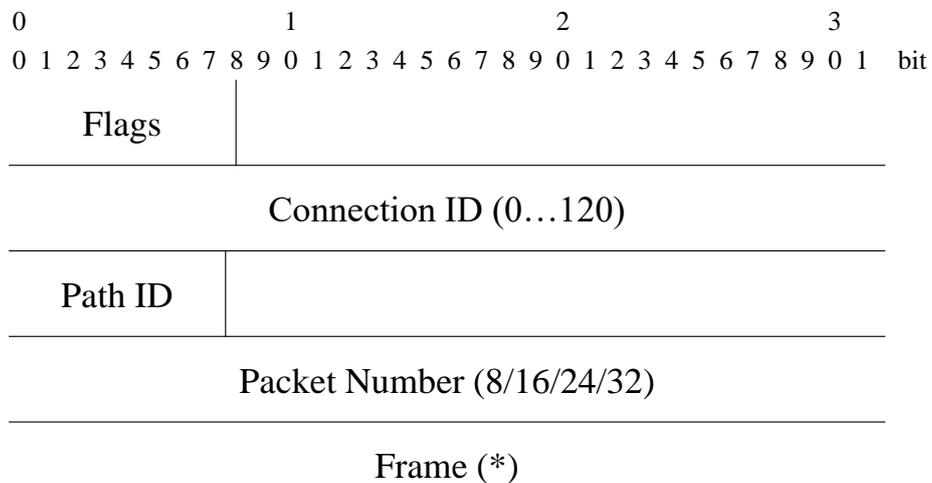


図 3.4: MPQUIC における標準的なパケットフォーマット [5]

ACK を返答するときに、特定の通信路に限定されることなく ACK を送信することが可能となる。具体的には、QUIC はパケットフォーマットに ACK 専用として割り当てるメモリは無く、ペイロード部のフレームとして ACK フレームが存在する。MPTCP ではパケットに ACK 専用メモリが割り当てられているため、サーバーはそれに従い指定され

た通信路を用いて ACK を返答する必要があるが、QUIC ではフレームとして ACK をメモリに割り当てることができるため柔軟性が高い。また、通信路ごとに RTT やパケットロスなどの無線品質を示す情報を収集、管理することができる。

パケットスケジューリング機能ではクライアントが複数の通信路と接続しているとき、どのパケットをどの通信路を用いて送信するか決定する機能である。従来手法においては Linux カーネルの MPTCP で実装されている標準のスケジューラー [44] が用いられている。これは、MPQUIC クライアントが周期的に送信する ping を用いて測定する RTT に基づいて通信路を決定しており、RTT が最も低いパスで優先して送信している。具体的にはパスマネジメント機能において収集されている測定された統計的な ping の RTT を用いて、輻輳ウィンドウが満杯になっていない場合に送信を行っている。また、パスマネジメント機能において新しい通信路と接続した場合、パスマネジメント機能は通信路の RTT の情報を所持していないため、その場合は新しい通信路に ping を送信し、RTT を測定するために待つ必要があるが、その間接続している他の通信路を利用することが可能となる。

しかしながら、自動運転車両のように移動体通信を考えたとき、障害物の影響で無線品質は局所的に劣化しやすい。従来の MPQUIC のように過去の観測した情報に基づいて無線品質を予測することで、データを送信する通信路を選択する場合、無線品質が局所的に劣化する環境では、予測した無線品質と車両の無線品質に差が生じ、劣化した通信路を使用し続けることで遅延が増加する。一方で LTE 回線はインターネット網を介するため、予測が困難なインターネット遅延によって通信遅延が増加してしまう。協調型自動運転のように遅延制約が厳しい場合においては、従来の MPQUIC を用いると遅延制約を超過する遅延が発生する可能性があり、遅延制約を満たしながらデータ送信が可能な回線を予測することは困難である。したがって提案手法では、車両が通信路の統計的な無線品質情報を所持し、それに基づいた通信路選択を行うことで無線品質が局所的に劣化した場合においても遅延制約を常に満たすことができる信頼性の向上したマルチパス通信を提案する。具体的には車両が路側機-車両間におけるアップリンクの受信電力を地図上に空間的に分布した電波マップを所持しているとし、予測した SNR とインターネット遅延を予測するための確率分布より各通信路におけるパケットロスの発生確率を予測する。その値を比較することでデータを送信する通信路を決定する手法を提案する。

### 3.3 MPQUIC の機能拡張

本節では従来の協調型自動運転における MPQUIC の課題を解決し、信頼性を向上したマルチパス通信を行うために無線品質情報を用いた MPQUIC の拡張モデルを提案し、性能評価を行う。提案手法では、RTT の代わりに SNR に対して閾値を設ける。具体的には車両が車両-路側機におけるアップリンクの受信電力を地図上に空間的に分布した電波マップ [31] を所持しているとし、車両の位置情報により予測できる SNR を利用してパケットロスの発生する確率を予測する。さらに、基地局においてはボトルネックとなるインターネット遅延に対して、遅延制約を閾値として設けることでパケットロスの発生確率を予測する。最後に各通信路で予測したパケットロスの発生確率を比較することでデータを送信する通信路を事前に決定する。

#### 3.3.1 システムモデル

図 3.5 にシステムモデルを示す。提案手法では、1 つの LTE 回線を有する基地局と 1 つの WiFi 回線を有する路側機、複数の車両数  $v_{\max}$  で構成される無線ネットワークを考える。また、車両を  $V = \{1, \dots, v, \dots, v_{\max}\}$  で示す。車両は無線ネットワークを利用し、データを路側機に送信することを目的とする。車両が基地局を用いる場合、インターネット網を介して路側機にデータを送信し、路側機を用いる場合は直接路側機にデータを送信できる通信経路を想定する。また、基地局の電波環境は常に無線品質が一定であり、路側機の電波環境は無線品質が局所的に劣化する環境を想定する。各車両はタイムスロット  $t$  でデータを送信する通信路  $p_v(t)$  を決定するものとする。

#### 3.3.2 受信電力の予測

提案手法では車両が路側機におけるアップリンク通信のパスロスやシャドーイングを含む受信電力を地図上に空間的に分布した電波マップ  $\mathbf{R}$  を所持しているものとする。各車両は位置情報  $q_v$  をタイムスロット  $t$  ごとに取得しているとし、車両は所持している電波マップ  $\mathbf{R}$  と車両の位置情報  $q_v(t)$  を照合することで、受信電力  $\mathbf{R}(q_v(t))$  を取得する。車両はタイムスロットごとに位置情報  $q_v$  を更新し、それに伴い予測する受信電力の値を更新する。したがって、次のタイムスロット  $t+1$  においては車両  $v$  の受信電力は  $\mathbf{R}(q_v(t+1))$  となる。

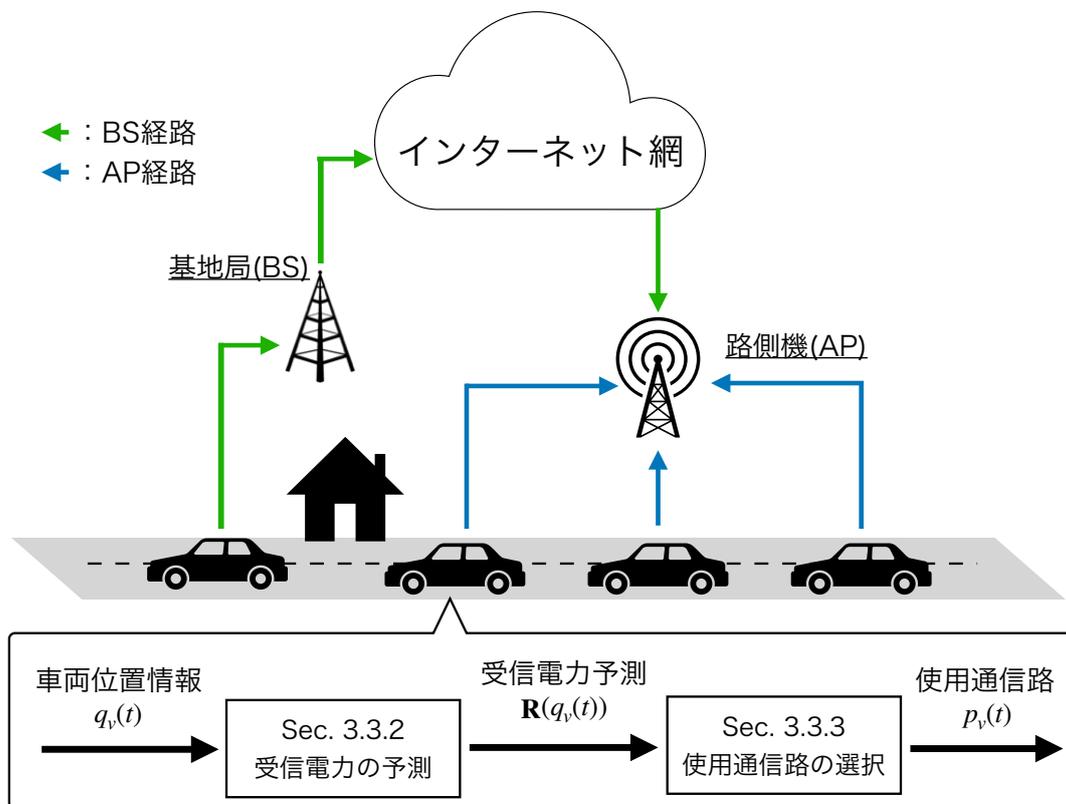


図 3.5: 提案するシステムモデル

### 3.3.3 使用通信路の選択

提案手法は各通信路におけるパケットロスの発生確率を予測し、その値に基づいてデータを送信する通信路を決定する。ここで、パケットロスは車両から路側機にデータが到達するまでの通信遅延がデータ生成周期を超過していた場合に発生したとしている。路側機においては予測した受信電力  $\mathbf{R}(q_v(t))$  を利用し、確率分布よりパケットロスの発生確率を導出する。車両が走行する際に観測する受信電力はレイリーフェージングの影響を受け瞬時に変動する。一方で、電波マップにおいて予測した受信電力  $\mathbf{R}(q_v(t))$  はタイムスロット  $t$  における時間平均の受信電力であり、レイリーフェージングの影響を取り除いているため、予測した受信電力と車両の受信電力は異なる。具体的にはレイリーフェージングの変動がおおよそ-20~10dB 程度であるため、瞬間的に車両の受信電力を観測する場合、同程度の差が発生する可能性は高い。車両が観測する SNR が 2 章において説明した

MCS 表における SNR の下限値以下となった場合、車両は決定できる変調方式・符号化率が存在しないため、データレートが 0 となり、パケットロスが生じてしまう。

一方で、SNR の瞬時変動は予測した受信電力を最頻値としたレイリー分布から導出することができる。受信電力の瞬時的な変動であるレイリーフェージングは、数  $m$  の範囲における平均受信電力を最頻値としたレイリー分布に従う。よって 3.3.2 節において予測した平均受信電力を最頻値とすることでレイリー環境下の受信電力分布が導出でき、さらに雑音電力を車両の走行で変化しない統計的な値とし、受信電力分布に考慮することでレイリー環境下の SNR の分布を導出することができる。

パケットロスの発生する確率を導出するため、レイリー環境下における SNR の確率分布をレイリー確率密度分布より示す。確率分布に対して通信遅延がデータ生成周期を超えてパケットロスが発生してしまう SNR の閾値を定義することで、パケットロスの発生確率を導出する。レイリー確率密度分布は以下の式で表すことができる。

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3.1)$$

レイリーフェージングは様々な位相の正弦波を合成した波形を対象として発生するフェージングであり、確率変数  $x$  はその合成波形である受信電力の振幅を示している。 $\sigma$  は最頻値、 $\sigma^2$  は平均受信電力の振幅を示している。式 (3.1) により、入力した平均受信電力の振幅を平均値としたレイリー分布を導出でき、分布はガンマ分布のような外形となる。

次に、レイリー環境下における真値の受信電力分布を導出する。受信電力分布では、式 3.1 における受信電力の振幅  $x$  を真値  $y$  にする必要がある。レイリー環境下における受信電力分布を以下に示す。

$$y = \frac{x^2}{2}, \quad (3.2)$$

$$f(y) = \frac{dx}{dy} \frac{\sqrt{2y}}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{2y}{2\sigma^2}\right), \quad (3.3)$$

$$= \frac{1}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{y}{\sigma^2}\right). \quad (3.4)$$

ここで、式 (3.2) では確率変数  $y$  は振幅  $x$  を真値にするため、振幅の二乗平均を求めている。次に、求めた受信電力の真値を  $p(x)$  に代入する。このとき、 $y$  は  $x$  の連続な 1 次導関数であるため、確率変数  $x$  の関数  $p(x)$  と確率変数  $y$  の関数  $f(y)$  には  $p(x)dx = f(y)dy$  の関係式が成り立つ。したがって、真値の受信電力の確率分布  $f(y)$  を導出できる。

しかしながら、真値の受信電力の確率分布  $f(y)$  は指数分布であり、最頻値  $\sigma$  が常に 0 の値を取ってしまう確率分布となってしまう。そのため、真値の受信電力  $y$  を対数値  $z$  に

する必要がある．式 (3.3) から対数値のレイリー環境下の受信電力の確率分布を以下のよう  
に導出する．

$$z = 10 \log(y), \quad (3.5)$$

$$g(z) = \frac{dy}{dz} \frac{1}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{10^{\frac{z}{10}}}{\sigma^2}\right), \quad (3.6)$$

$$= \frac{10^{\frac{z}{10}}}{10\sigma^2 e} \exp\left(-\frac{10^{\frac{z}{10}}}{\sigma^2}\right). \quad (3.7)$$

式 (3.5) では受信電力の真値  $y$  を対数値  $z$  にしている．さらに， $z$  は  $y$  の連続的な 1 次導関数であるため， $f(y)dy = g(z)dz$  の関係式が成り立ち，対数値の受信電力の確率分布  $g(z)$  を導出することができる．

また，SNR の確率分布は雑音電力が一定の場合，受信電力の分布と同じ外形をしており， $g(z)$  を求めた後に受信電力と雑音電力の差分で導出することが可能である．以上により求めたレイリー環境下における確率分布により，路側機におけるパケットロスの発生確率を予測する．初めに，式 (3.6) の  $\sigma^2$  に対して電波マップより予測した受信電力を入力する．次に，SNR に対してパケットロスが発生する閾値を設ける．SNR の閾値には WiFi を用いる路側機においては Wireless professional が提唱する MCS 表を用いて変調方式・符号化率が決定できない SNR の下限値を閾値としている．よってパケットロス発生確率の予測値  $\text{loss}_a$  は路側機における SNR の閾値を  $x_a$  とし，統計的な雑音電力の値を  $n$  とすると，以下のように導出できる．

$$\text{loss}_a = 1 - \int_{x_a - n}^{\infty} g(z) dz. \quad (3.8)$$

一方で基地局においては，無線品質がほぼ一定である環境を想定しているため，基地局の SNR が CQI 表の下限値を下回ることはない．しかしながら基地局はインターネット網を介すため，インターネットによる遅延の影響で通信遅延は大きくなる．インターネット網による遅延は車両-基地局間でデータを送信した伝送遅延と比較して大きく，基地局による通信のボトルネックになる可能性がある．一方で，インターネット遅延はインターネット網が混雑していない時間帯においては正規分布に従うとされている [45, 46]．したがって基地局におけるパケットロス発生確率の予測値は，インターネット網による遅延を示した正規分布に対して，遅延の閾値を設けることで導出する．具体的には，提案手法においてパケットロスは通信遅延がデータ生成周期を超過した場合と定義しているため，閾値としてデータ生成周期を考慮した値を用いる．

以下にインターネット遅延を示す正規分布の式を示す..

$$\mathcal{N}(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}. \quad (3.9)$$

ここで、確率変数  $l$  はインターネット遅延を示しており、 $\sigma$  は標準偏差を示し、 $\mu$  はインターネット遅延の平均を示している。基地局においては、インターネット遅延に対してデータ生成周期を超過しないよう、インターネット遅延の閾値を設けることでパケットロスの発生する確率を導出する。また基地局ではレイリーフェージングの影響を取り除くために、章 2 において説明した CQI 表に用いる SNR には  $r$  レイリーフェージングに対するマージンを用いている。ここでレイリーフェージングに対するマージンをレイリー分布の 99.7% を保証するものとするとする。したがって基地局におけるパケットロス発生確率の予測値は基地局における遅延の閾値を  $x_b$  としたとき、以下のように導出できる。

$$\text{loss}_b = 0.003 + (1 - 0.003) \int_{x_b}^{\infty} \mathcal{N}(l) dl \quad (3.10)$$

ここで、 $\mathcal{N}$  は正規分布による確率を示し、 $l$  はインターネット遅延を示している。

これらの予測したパケットロスの発生確率から、通信路を以下のように決定する。

$$p_v(t) = \begin{cases} AP, & \text{loss}_a < \text{loss}_b \\ BS, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.11)$$

## 3.4 性能評価

本節では提案する協調型自動運転のための信頼性を向上したマルチパス無線通信についてシミュレーションにより評価する。また、提案するマルチパス通信と従来のマルチパス通信を比較する。

### 3.4.1 シミュレーション環境

初めにシミュレーションにおける諸元を表 3.1 を用いて説明する。提案手法は LTE 回線を有する 1 台の基地局と WiFi 回線を有する 1 台の路側機、それらの無線システムに接続可能な 4 台の車両によって構成される無線ネットワークを想定する。このシミュレーションでは車両は路側機にデータを送信することを目的とするため、車両が WiFi 回線を用いる場合は路側機に直接通信を行い、LTE 回線を用いる場合はインターネット網を介して路側機に送信する。提案するシステムが有効であることを示すため、各車両で路側機

表 3.1: シミュレーションの諸元

シミュレーション時間	5 sec	路側機周波数帯域幅	40 MHz
車両数	4 台	基地局周波数帯域幅	120 MHz
車両速度	40 km/h	路側機送信電力	10 dBm
通信路制御周期	500 msec	基地局送信電力	20 dBm
データ生成周期	50 msec	路側機閾値	5 dB
データサイズ	100 kbyte	基地局閾値	30 msec
雑音電力	-120 dBm		

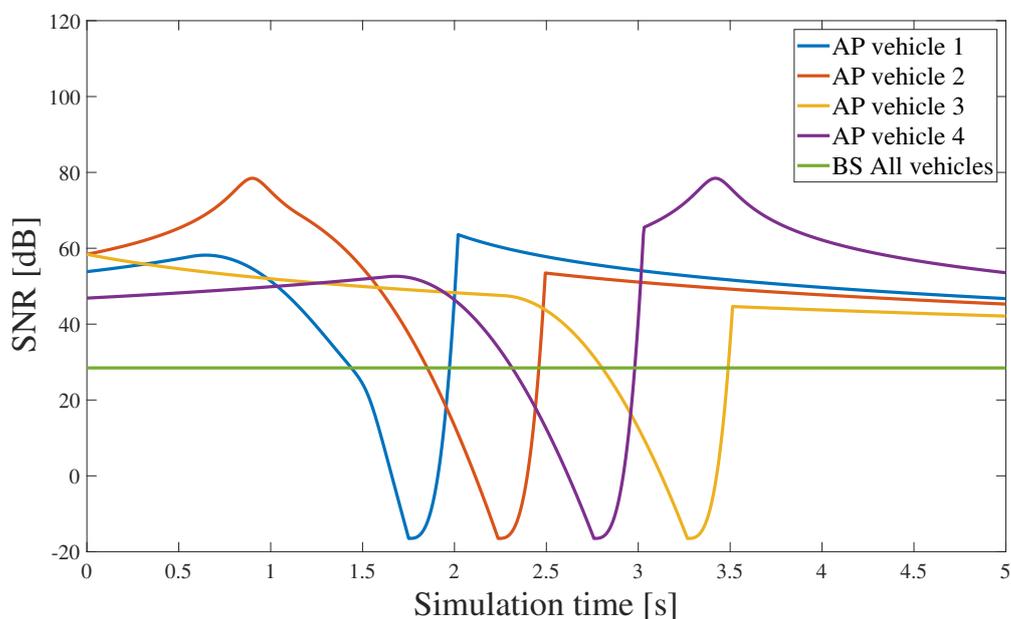


図 3.6: シミュレーションにおける各車両の SNR

において無線品質が局所的に劣化し、基地局においては常に一定の無線品質である環境を想定する。具体的には、車両の電波環境は基地局、路側機ともに自由空間電波伝搬に従うとし、車両が任意の距離を走行後、路側機の無線品質が二次関数的に減少し、0dB 以下になる地点が存在するとする。車両が直線道路を常に 40 km/h の速度で走行するとしたときの車両のレイリーフェージングを含まない SNR を図 3.6 に示す。車両の走行時には図 3.6 に加えレイリー分布に従うフェージングが発生している。

シミュレーションは 5s 間行い、4 台の車両がデータ生成周期 50 msec ごとに 100 kbyte

のデータを生成するとする。よってシミュレーション時間内において車両は1台当たり100回データを生成している。また、通信路を制御するための周期は500msとしている。提案手法ではパケットロスの発生確率を推定するために、路側機においてはSNRの閾値を5dBとし、基地局においては閾値を30msecとする。

### 3.4.2 従来のマルチパス通信の実装

従来のマルチパス通信であるMPQUICはpingのRTTに基づいてデータを送信する通信路を選択する。そのため、従来手法においてはデータ生成周期とは別にpingも周期的に生成し、基地局、路側機に対して送信する。また、従来手法では車両においてpingとデータの生成周期が一致した場合、pingを優先して送信するとする。これは、pingを送信する目的がデータを送信する通信路を決定するためのRTTの測定のほかに、通信路が路側機と安定して通信可能であるかを調査することであるため、pingを優先的に送信している。

表 3.2: ping の生成周期とデータサイズ

ping 生成周期	100 msec
ping データサイズ	32 byte

pingの生成周期とデータサイズを表3.2に示す。シミュレーションでは通信路を切り替える制御周期を500msecとしているため、pingの生成周期を100msecとした場合、従来手法では5つのpingを送信する。通信路の制御時には、5つのpingのRTTの平均値を基地局、路側機で比較し、平均RTTが低い通信路をデータを送信する通信路として利用する。

### 3.4.3 シミュレーション結果

本節では従来手法であるpingによるRTTに基づいて通信路を選択するMPQUICと提案手法である電波マップを用いたパケットロス発生確率の推定値に基づいて通信路を選択する拡張したMPQUICの性能を比較し、提案手法が信頼性を向上できる点で有効であることを示す。評価には送信したデータごとの通信遅延を利用し、通信遅延 $\tau$ がデータ生成周期 data period を超過していた場合にパケットロスとして扱い、遅延の値を0と

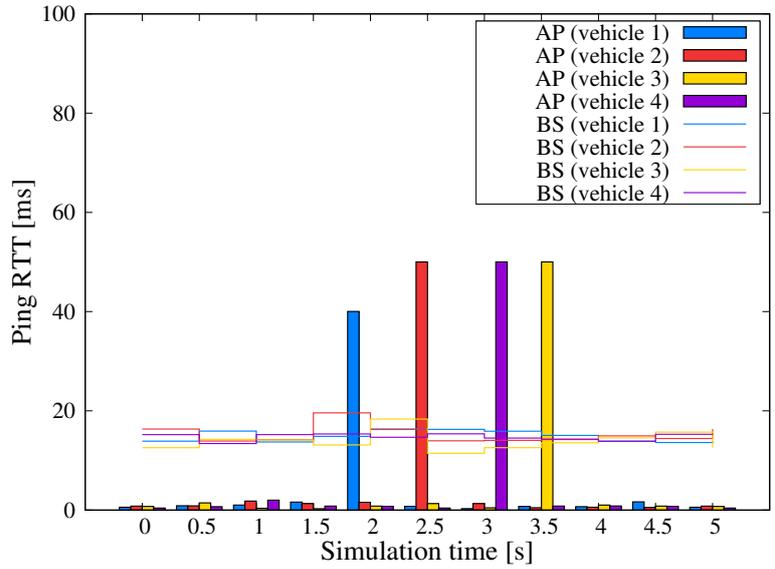


図 3.7: 各車両における ping の RTT (従来手法)

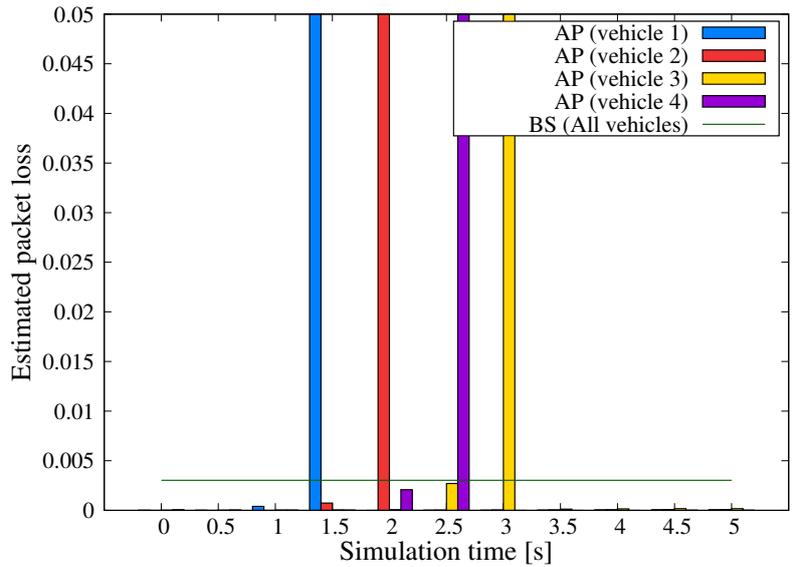
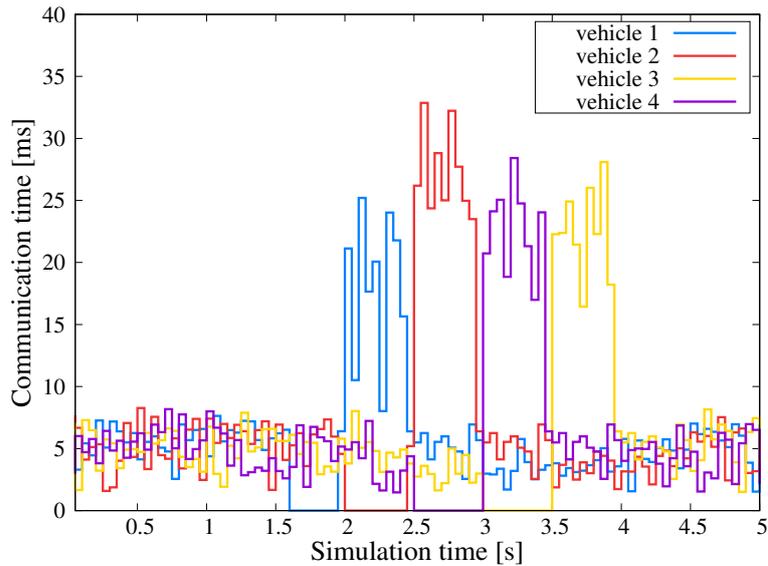


図 3.8: 各車両における各通信路のペケットロス発生確率 (提案手法)

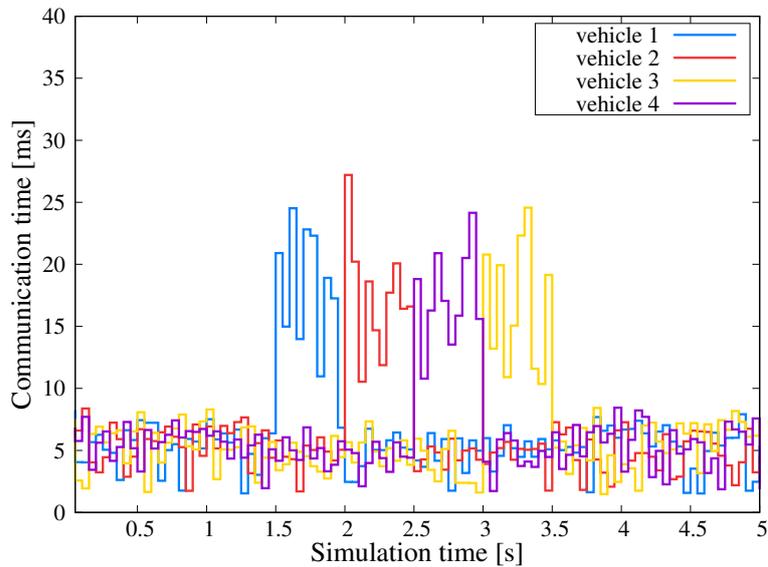
する.

$$\tau = \begin{cases} 0, & \tau > \text{data period} \\ \tau, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.12)$$

初めに従来手法と提案手法のシミュレーション時間において利用する通信路を示すために、図 3.7 に車両の各通信路における ping の RTT を示し、図 3.8 に車両の各通信路にお



(a) 従来手法



(b) 提案手法

図 3.9: 各車両における通信遅延. 従来手法では無線品質が劣化した場合, パケットロスが発生するが, 提案手法ではほとんどのデータを送信できる.

けるパケットロスの発生確率を予測した値を示す. 図 3.8 では基地局におけるパケットロスの発生確率を予測するために平均  $\mu$  が 10 msec であり, 標準偏差  $\sigma$  が 5 msec の正規分布を考えている. 実際に発生するインターネット遅延は平均  $\mu$  が 10 msec であり, 標準偏差  $\sigma$  が 5 msec の正規分布に従うとし, パケットロスの発生確率と同じ分布である理想環境を想定する.

従来手法では、RTT が低い通信路をデータの伝送に利用するため、図 3.8 における路側機の RTT が基地局の RTT を超過している時間においては基地局を利用しており、そのほかでは路側機を用いている。具体的には、車両 1 においては 1.5 sec ~ 2.0 sec において測定した RTT が図 3.7 上の 2.0 sec に示されており、路側機の RTT が基地局の RTT を超過しているため、2.0 sec ~ 2.5 sec において基地局を利用していることを示している。

提案手法では、電波マップとインターネット遅延の分布に基づいて予測したパケットロスの発生確率によりデータを送信する通信路を決定している。車両は路側機の受信電力を電波マップにより事前に知ることが可能であり、RTT を測定するために待つ必要はない。したがって、従来手法と比較して提案手法の選択する通信路は 1 タイムスロット分早いことがわかる。具体的に、車両 1 が 2.0 sec ~ 2.5 sec で基地局を利用していることを示している。

次に従来手法と比較して提案手法が局所的な無線品質の劣化に対してパケットロスが発生していないことを示すため、シミュレーション時間における遅延とパケットロスについて評価した結果を示す。パケットロスは遅延制約を超過し、破棄されることで相手に届いていない状況を示すため、遅延の値を 0 としている。図 3.9 に各車両におけるシミュレーション時間におけるデータ送信数毎の通信遅延を示す。図 3.9(a) の従来手法では局所的に無線品質が劣化する 1.5 sec ~ 2.0 sec では、その地点における RTT が測定できていないため通信路の切り替えができず、劣化した部分で多数のパケットロスが生じてしまっている。一方で、提案手法では図 3.9(b) においてパケットロスは発生しておらず、局所的に無線品質が劣化している環境において電波マップを利用することで適切に通信路を切り替えることができているため、想定する環境において有効であることを示している。さらに、SNR が回復した 2.0 sec ~ 2.5 sec では不確定なインターネット遅延による影響を受けない WiFi を用いており、パケットロスのリスクを回避していることがわかる。

次にインターネット遅延の変動による提案手法の信頼性への影響を調査する。インターネット遅延は不確実性があり、想定する無線ネットワーク外のほかのユーザーのインターネット利用状況にもよって大きく遅延は変化する。したがって、理想的な環境だけではなくパケットロスの発生確率を予測する正規分布とインターネット遅延の分布にずれがある状況に対して提案手法が有効的であるのかを検討する。具体的にはインターネット遅延を示す正規分布の平均  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  の値を変化し、パケットロス率を評価する。

パケットロス率は遅延制約であるデータ生成周期を超過した遅延を持つデータ数に対して、無線ネットワーク内で各車両が送信されたデータ数を除数とした商で導出する。インターネット遅延の分布を変化したときのパケットロス率を表 3.3、表 3.4 に示す。様々なインターネット遅延の影響を調査するため平均、標準偏差ともに 5msec 間隔で変化する

表 3.3: インターネット遅延の変化におけるパケットロス率 (従来手法)

標準偏差 平均	5 msec	10 msec	15 msec	20 msec
	10 msec	0.09	0.09	0.09
15 msec	0.09	0.09	0.0925	0.095
20 msec	0.09	0.0925	0.0925	0.105
25 msec	0.09	0.0925	0.105	0.115
30 msec	0.0925	0.1	0.1175	0.12

表 3.4: インターネット遅延の変化におけるパケットロス率 (提案手法)

標準偏差 平均	5 msec	10 msec	15 msec	20 msec
	10 msec	0	0	0
15 msec	0	0	0	0
20 msec	0	0	0	0.0025
25 msec	0	0	0.0025	0.0075
30 msec	0	0.0075	0.0125	0.0275

よう定義し、全 20 通りの調査を行う。また、基地局におけるパケットロスの発生確率を予測するための正規分布は平均  $\mu$  が 10 msec であり、標準偏差  $\sigma$  が 5 msec で固定である。路側機、基地局ともにパケットロス発生確率の予測値は変化していないため利用する通信路は変化しない。従来手法においても局所的に無線品質が劣化しているところでは ping がパケットロスが発生しており、インターネット遅延の増加分より通信遅延が大きくなっているため、従来手法、提案手法ともに利用する通信路は図 3.8、図 3.7 から変化していない。表 3.4 では従来手法と比較して提案手法は常にパケットロス率が低い値を保っているが、インターネット遅延が大きくなるにつれパケットロス率も増加してしまっている。どちらの手法もパケットロス率は増加しており、上がり幅もほぼ同じであることから LTE 回線を用いたときにのみ発生するパケットロスであることが考えられる。

## 3.5 結論

本章では QUIC をマルチパスに拡張した MPQUIC について説明を行った。これまでの MPQUIC は RTT などの統計的な情報から車両の無線品質を推定することでデータを送信する通信路を決定する。そのため局所的に無線品質が劣化した場合、劣化部分を予測する RTT が存在しないため、通信路を切り替えることができずに通信遅延が増加する。よって遅延制約が厳しい協調型自動運転では信頼性が損なわれる課題があった。提案手法では、車両が路側機における無線品質情報を所持し、SNR に対して閾値を設けることで各通信路のパケットロスの発生確率を予測し、その値に基づいて通信路選択を行うことで局所的に無線品質が劣化する環境においても遅延制約以下であることを保証したデータ送信を行うことが可能である。したがって提案手法は、信頼性を確保できることを示した。

しかしながら、提案手法はインターネット遅延が増加した場合、LTE 回線では遅延制約を超える遅延が発生しパケットロスが増加することで、信頼性が下がってしまう課題がある。提案手法である拡張した MPQUIC は協調型自動運転において利用するアプリケーションを考慮していない。アプリケーション層において、無線品質に応じてデータ量を低減することで通信遅延を改善し、インターネット遅延の影響を受けても常に遅延制約以下であることを保証することができる。4 章では、協調型自動運転におけるアプリケーションを映像伝送とし、遅延を保証した高信頼映像伝送について提案する。

## 第4章

# 高信頼映像伝送

### 4.1 序論

本章では協調型自動運転において車両が路側機に基地局を介して車両の走行映像を送信することで車両の走行をサポートするアプリケーションを想定し、その映像伝送手法について従来手法と提案する高信頼型映像伝送手法について説明する [7, 8]. さらに、信頼性について性能評価を行う。自動運転における映像配信は遅延制約がほかのアプリケーションよりも厳しく、車両から送信された映像に基づいて遠隔地のドライバーが車両を運転する場合においては時速 40 km で遅延が 0.2 sec 以上である場合に操作性が損なわれ、指定された走行経路を逸れてしまうことが確認されている [20].

これまでの映像伝送手法は過去に送信したビデオフレームの統計的な遅延より、送信するビデオフレームの解像度を決定する AVS を用いている [29, 47]. また、無線通信はベストエフォート方式を用いているため、基地局は無線ネットワーク内で周波数利用効率が最も高くなるように各車両に対して周波数帯域幅を割り当てる [48, 49]. そのため、局所的に無線品質が劣化した環境では無線品質に対して過剰な解像度でビデオフレームを送信してしまい、遅延が増加するほか、無線品質が劣化した環境ではスループットが著しく低下するため、映像伝送手法において最低の解像度にしたとしても遅延が増加してしまう。

従って、本章では基地局が車両-基地局間のアップリンク通信における受信電力を地図上に空間的に分布した電波マップを所持しているとし、車両の走行ルート情報に基づいて SNR を予測、ビデオフレームの解像度の事前決定を行うことで局所的に無線品質が劣化した場合においても遅延制約を超える遅延を発生することなく映像を送信できる基地局介入型映像伝送手法を提案する。また、提案手法では基地局は映像品質が劣化したビデオフレームに対して深層学習を用いた超解像を行うことで高品質な映像を路側機に送信する。

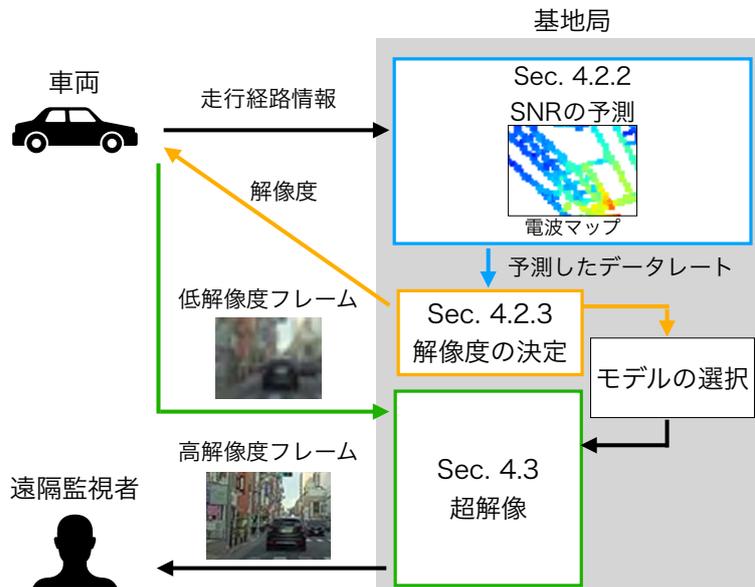


図 4.1: 基地局介入型映像伝送手法におけるシステム構成図

超解像モデルは既存のモデル [6, 50] に基づいて処理時間を低減した軽量化モデルを提案している。

## 4.2 基地局介入型映像伝送

本節では基地局の無線品質が局所的に劣化した場合において、映像伝送に対して基地局が介入することで伝送遅延を保証する新たな映像伝送手法を提案する。本手法では、基地局が車両の走行経路情報と車両から基地局へのアップリンクの受信電力強度を地図上に空間的に分布した電波マップを用いて将来の SNR を予測する。そして、予測した SNR に基づいて基地局は遅延制約以下となるようにフレームの解像度を決定する。さらに、解像度が低下し、画像品質が劣化したビデオフレームに対して深層学習を用いた超解像を行うことで常に一定の画像品質で路側機に映像を伝送することができる。

### 4.2.1 システムモデル

図 4.1 にシステムの概要図を示す。1つの基地局の通信範囲に車両が  $v_{\max}$  台存在する環境で無線ネットワークが構築されているとする。基地局はアップリンク通信が可能な帯域  $f$  を所持しており、Frequency-Division Multiple Access (FDMA) によって、 $v_{\max}$  の

サブキャリアに分割し、各車両が  $f/v_{\max}$  の独立した帯域幅をいつでも利用できることと仮定する。また、提案手法ではタイムスロット長が 1 sec の離散時間システムを考え、タイムスロットは  $T = \{1, \dots, t, \dots, t_{\max}\}$  とする。さらに各車両はタイムスロットごとに移動しているとし、その時の車両  $v$  の走行経路情報を  $Q_v = \{q_v(1), \dots, q_v(t), \dots, q_v(t_{\max})\}$  とする。ここで  $q_v(t)$  はタイムスロット  $t$  における車両  $v$  の緯度-経度の位置座標を示している。

#### 4.2.2 電波マップを用いた QoS の予測

基地局における QoS の予測にはアップリンク通信の電波マップ  $\mathbf{R}$  を用いる。電波マップはパスロスやシャドーイングといった電波伝搬における空間的な変動を推定することができる。基地局は車両が走行を開始するタイムスロットが 1 であるときに走行経路情報をすべての車両から収集する。さらに、基地局は電波マップ  $\mathbf{R}$  に対し、収集した経路情報  $q_v(t)$  を入力することで車両の受信電力  $\mathbf{R}(q_v(t))$  を推定することができる。

一方で、マルチパスフェージングの影響により実際の受信電力は瞬時に変動することとなる。提案手法ではタイムスロットごとに SNR を推定するため、推定したい SNR の値は 1 sec における平均となり、フェージングによる影響を取り除くことができる。従って、電波マップの値と等しくなるため、電波マップによる推定が可能となる。基地局が車両  $v$  の SNR  $\eta_v(t)$  を電波マップより推定するとき、以下の式で表すことができる。

$$\eta_v(t) = \mathbf{R}(q_v(t)) - n - h, \quad (4.1)$$

ここで、 $n$  はノイズフロアを示し、 $h$  はレイリーフェージングに対するマージンである。基地局は推定した SNR  $\eta_v(t)$  に基づいて、3GPP が提唱する CQI 表から周波数利用効率  $\epsilon(\eta_v(t))$  を決定する。よって車両  $v$  におけるアップリンクのデータレート  $d_v(t)$  は以下の計算式で導出できる。

$$d_v(t) = \frac{f}{v_{\max}} \epsilon(\eta_v(t)). \quad (4.2)$$

#### 4.2.3 解像度の決定方法

基地局は QoS を予測後、映像配信の遅延が遅延制約以下となるような解像度を決定する。基地局は遅延制約以下となるようなビデオフレームの解像度のセット  $K_v = \{k_v(1), \dots, k_v(t), \dots, k_v(t_{\max})\}$  を車両に送信し、車両はタイムスロットごとに基地局より指定された解像度に従ってビデオフレームの解像度を変更する。また、ここでは  $m$  個

の解像度が選択できると仮定している．タイムスロット  $t$  における車両  $v$  の解像度は次のように決定する．

$$\max k_v(t), \text{ s.t. } cb(k_v(t)) \leq d_v(t). \quad (4.3)$$

ここでは， $b(k_v(t))$  はビデオフレームの解像度が  $k_v(t)$  である時のビットレート， $c$  は frame par second (FPS) を示す．基地局は，車両  $v$  において決定した解像度  $K_v$  を車両に送信する．車両は  $K_v$  に従ってビデオフレームの解像度をバイキュービックダウンサンプリングを行うことで変更し，その後 2 次元離散コサイン変換で符号化し，基地局へ送信する．

基地局は車両から受信したビデオフレームを任意の解像度  $k_{\text{target}}$  に深層学習による SR を用いてアップサンプリングする．ここでは  $k_{\text{target}}$  をフル HD (1920×1080) としている．提案手法では  $m$  個の解像度を想定しており，解像度  $k$  毎に  $m$  個のモデル  $s_k$  を用意している．モデル  $s_k$  は入力された解像度  $k$  を  $x_k = k_{\text{target}}/k$  倍にアップサンプリングするものとする．提案する解像度決定方法により，基地局は将来のビデオフレーム  $K_v(t)$  の解像度をあらかじめ把握しているため，適切なモデル  $s_k$  を用いて超解像を実行することができる．適切な超解像モデルを用いることで受信フレーム  $\mathbf{A}_v^i(t)$  をアップサンプリングすることができる．

$$\hat{\mathbf{A}}_v^i(t) = s_k(\mathbf{A}_v^i(t)), \quad (4.4)$$

ここでは， $\hat{\mathbf{A}}_v^i(t)$  の解像度は  $k_{\text{target}}$  となる．その後，基地局は超解像後のフレーム  $\hat{\mathbf{A}}_v^i(t)$  を路側機に送信する．

### 4.3 超解像モデル

図 4.2 に超解像モデルを示す．図 4.2 の超解像モデルは FRVSR [6] に基づいて設計されており，オプティカルフロー推定ネットワークである FNet と超解像ネットワークである SRNet で構成されている．超解像モデルでは，FNet と SRNet を学習している．高解像度フレーム  $\hat{\mathbf{A}}_v^i(t)$  を得るために，現在の低解像度ビデオフレーム  $\mathbf{A}_v^i(t)$  と過去の低解像度フレーム  $\mathbf{A}_v^{i-1}(t)$ ，過去の高解像度フレーム  $\hat{\mathbf{A}}_v^{i-1}(t)$  を使用する．

まず，FNet は  $\mathbf{A}_v^i(t)$  と  $\mathbf{A}_v^{i-1}(t)$  の間でオプティカルフロー推定を行う．

$$\mathbf{F}_{\text{LR}} = \text{FNet}(\mathbf{A}_v^i(t), \mathbf{A}_v^{i-1}(t)) \in [-1, 1]^{H \times W \times 2}, \quad (4.5)$$

ここで， $H$  と  $W$  は垂直方向と水平方向の画素数を示している．オプティカルフロー推定では， $\mathbf{A}_v^i(t)$  と  $\mathbf{A}_v^{i-1}(t)$  の時系列フレームを入力に用いることで画素の関係から物体の移動を認識することができる．



表 4.1: シミュレーションの諸元

電波マップ観測地	東京九段下駅
シミュレーション時間	30 sec
車両数 $v_{\max}$	4 台
雑音電力 $n$	-100 dBm
マージン $h$	-11.5 dB
アップリンク周波数帯域幅 $f$	20 MHz
フレームレート $c$	14 fps
車両における解像度 $k_v$	192×108
	320×180
	384×216
	480×270
超解像後の解像度 $k_{\text{target}}$	1920×1080

## 4.4 性能評価

本節では提案した基地局が解像度決定に介入する基地局介入型映像伝送に関して従来手法と比較し、信頼性を評価する。

### 4.4.1 シミュレーションの諸元

初めにシミュレーションにおける各諸元を説明する。シミュレーションでは1台の基地局と4台の車両から構成される無線システムを想定する。また、電波伝搬は東京の都市部での受信信号強度の測定データを使用する。雑音電力は -100 dBm , マルチパスフェージングに対するマージンはレイリー分布を 99.7% 保証可能である値として、 -11.5 dB とする。提案するシステムが有効であることを示すために、各車両では異なる SNR を得る経路を考える。具体的には、図 4.3 に示すように常に無線品質が良い車両 1, 無線品質が良い場所から悪い場所に移動する車両 2, 無線品質が悪い場所から良い場所に移動する車両 3, 常に無線品質が悪い車両 4 について考える。基地局においてアップリンク通信の帯域幅を 20MHz とし、提案手法では周波数帯域幅を車両に均等に割り当てるため、各車両の帯域幅は 5 MHz となる

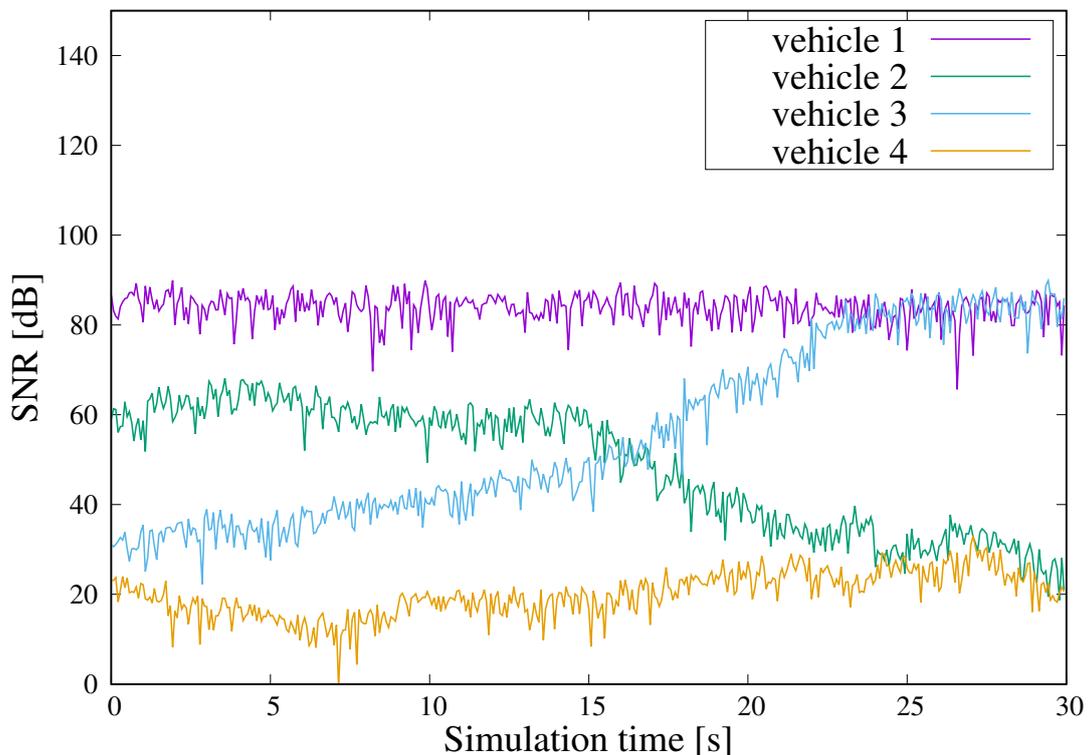


図 4.3: 車両が走行することによって得られる SNR

シミュレーションの総時間を 30 sec とし、各車両は路側機に対して 14 fps のビデオフレームを送信する。従って、シミュレーション内で車両が路側機に送信するビデオフレームの総数は 1680 となる。映像解像度の制御周期は 1 sec で、車両が変更する解像度として、 $\{192 \times 108, 320 \times 180, 384 \times 216, 480 \times 270\}$  の 4 段階を想定する。超解像後の解像度は  $1920 \times 1080$  とする。従って、超解像モデルの倍率は  $\{10, 6, 5, 4\}$  となる。

#### 4.4.2 評価指標

提案するシステムは高品質な映像を安定かつ低遅延で配信することを目的としている。よって評価指標では映像品質と遅延を確認するため、Effective peak signal-to-noise ratio (EPSNR) を用いている。

$$\text{EPSNR} = \beta \text{PSNR}, \quad (4.9)$$

ここで、 $\beta$  は映像のフレームが遅延制約を満たしているかを示す 2 値変数である。自動運転における映像伝送は遅延が 0.2 sec 以下であることが求められている。また、ビデオフレームレートは 14 fps であるため、各タイムスロットにおける最終ビデオフレームの送信

開始タイミングは  $1 - 1/14 = 0.93 \text{ sec}$  である。これらの仮定から、遅延制約のための 2 値変数を以下に示す。

$$\beta = \begin{cases} 1, & \tau < 1.13, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\tau = \frac{cb(k)}{d_v(t)} + t_{\text{sr}}, \quad (4.11)$$

ここで、 $\tau$  はタイムスロット  $t$  における最終フレーム  $a_v^{14}(t)$  の遅延を示し、 $t_{\text{sr}}$  は超解像に要する処理遅延を示す。超解像に要する処理遅延の平均値を測定し、 $t_{\text{sr}}$  を  $0.04 \text{ sec}$  と設定する。

#### 4.4.3 従来手法の実装

従来手法である基地局が映像配信に介入しない従来の AVS について説明する。基地局は従来のベストエフォート方式に従って周波数帯域幅を割り当てており、路側機が映像における解像度の制御と超解像を実行するとする。基地局は自身の周波数効率を最大化することを目的とし、帯域幅を車両に割り当てるため、接続車両の過去の SNR である  $\eta_v(t-1)$  に基づく、周波数効率の良い周波数帯域幅割り当てモデルを考える。周波数帯域幅割り当て手法  $f_v(t)$  と対応するデータレート  $d_v(t)$  は以下の式のように表すことができる。

$$f_v(t) = \frac{\eta_v(t-1) \cdot f}{\sum_{u=1}^{v_{\text{max}}} \eta_u(t-1)}, \quad (4.12)$$

$$d_v(t) = f_v(t) \epsilon(\eta_v(t-1)). \quad (4.13)$$

図 4.4 は各車両のシミュレーション時間における周波数帯域幅を示している。提案手法では帯域を均等に割り当ててるのに対し、従来手法では過去の SNR に比例して帯域幅を割り当てている。

従来手法では、路側機がタイムスロット  $t-1$  に測定された遅延をもとにタイムスロット  $t$  における解像度を決定している。具体的には、以下のように解像度を決定する。

- (1) タイムスロット  $t-1$  の  $\tau$  が  $1.13 \text{ sec}$  より大きい場合、タイムスロット  $t$  の解像度を低下させる。
- (2) タイムスロット  $t-1$  の  $\tau$  が  $1.0 \text{ sec}$  より小さい場合、タイムスロット  $t$  の解像度を向上する。
- (3) それ以外の場合はタイムスロット  $t-1$  の解像度を維持する。

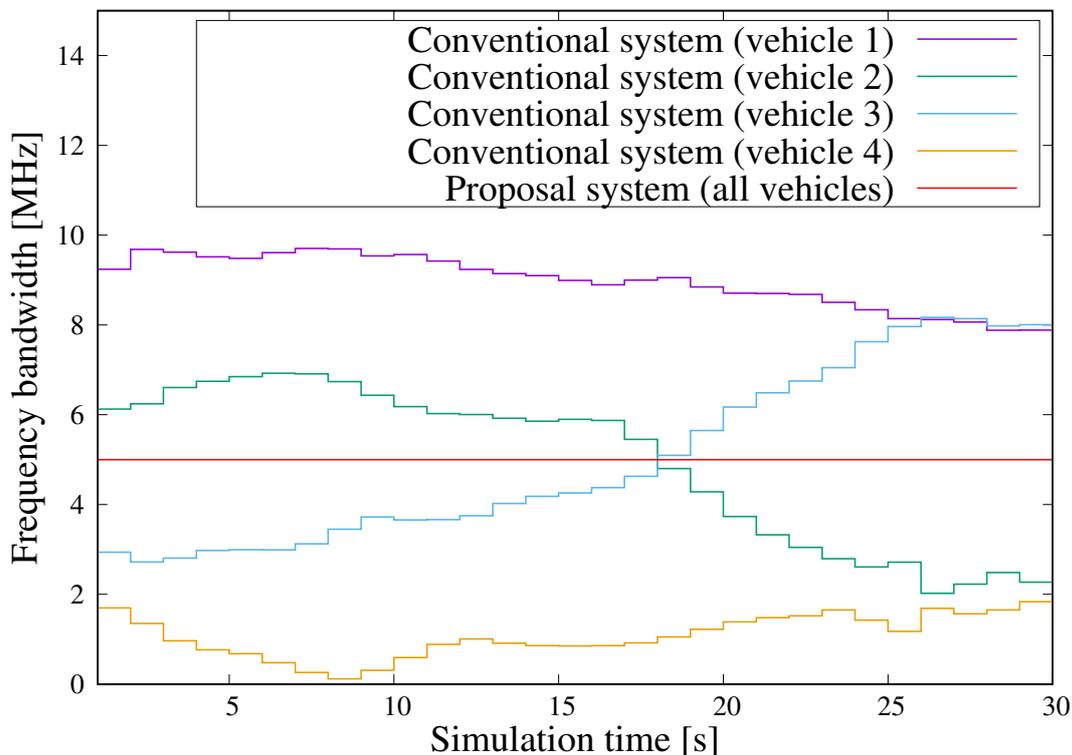


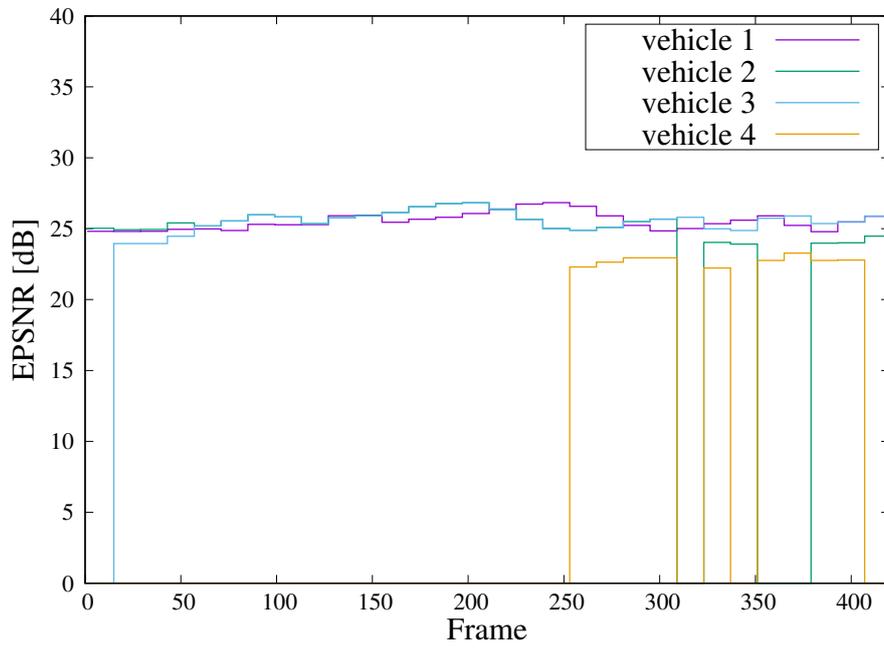
図 4.4: 従来手法と提案手法における各車両の周波数帯域幅

しかし、従来手法における映像配信では、無線品質が突然変化した場合、データレートに対して過剰な解像度でフレームを送信するため、大きな遅延が発生する可能性がある。

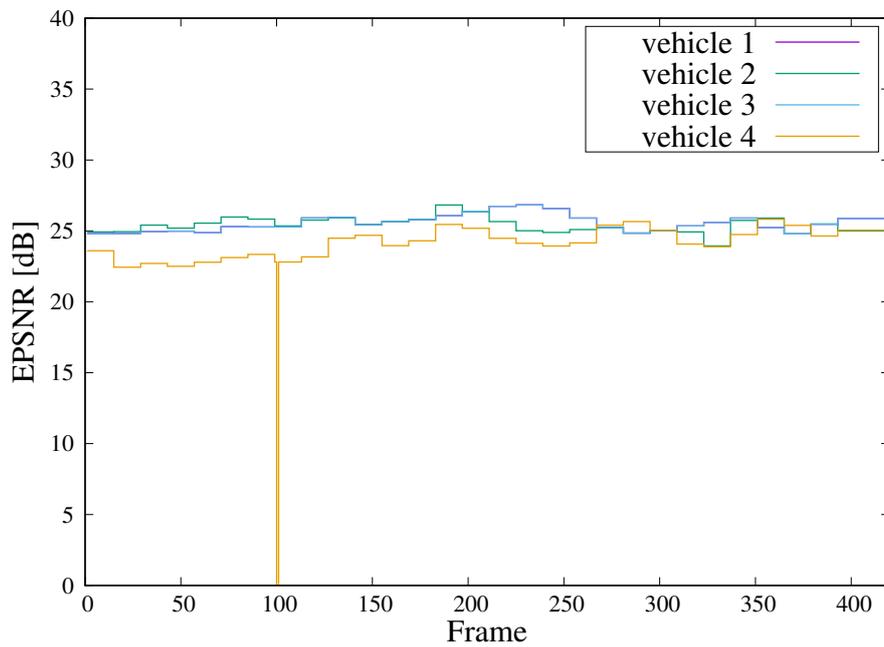
ここでは従来手法では路側機が学習した超解像モデルを用いて超解像を行うと仮定する。これにより、提案する高信頼映像配信手法と従来の AVS を比較することができる。

#### 4.4.4 シミュレーション結果

図 4.5(a) に従来手法の EPSNR を示し、図 4.5(b) に提案手法の EPSNR を示す。ビデオフレームの初期解像度は、全車両で  $480 \times 270$  としている。図 4.5(a) では、どの時間においても SNR が常に高い車両 1 の場合、EPSNR は常に高く、また  $480 \times 270$  の解像度のフレームを送信するために十分な帯域幅を所持しているため、全てのフレームが遅延制約を満たしていることがわかる。時間経過とともに SNR が低下する車両 2 の場合、SNR の変動に応じて割り当てる帯域幅も低下するため 23 sec 以降は遅延制約を満たすことができていない。これに対して、時間の経過とともに SNR が上昇する車両 3 においては、始めは割り当てる帯域幅に対してフレームの初期解像度が高いため、EPSNR が 0 と



(a) 従来手法



(b) 提案手法

図 4.5: ビデオフレームごとの各手法における EPSNR. 従来手法では SNR の低い車両は遅延制約を満たすことができていない. 提案手法では QoS を予測することによって全ての車両がほとんどのビデオフレームが遅延制約を満たすことができる.

なっている。次のタイムスロット以降は、路側機が解像度を下げているため、遅延制約を満足させていることができている。常に SNR が低い車両 4 においては、EPSNR は 0 となってしまう。これは、システムにおいて最も低い解像度  $192 \times 108$  を送信するのに十分な帯域幅を持っていないためである。

一方で図 4.5(b) では、全車両に同じ帯域幅を割り当てているため、電波マップと走行ルート情報により容易にデータレートを予測することが可能となっている。各車両の EPSNR は常に高い値を維持しており、ほとんどのフレームで遅延制約を満足することができる。これは従来手法と比較して、各車両がフレームを送信するための周波数帯域幅を持っているためである。一方で、車両 4 において 1 フレームパケットロスが発生している。これは提案手法において設定したマージンを超過するレイリーフェージングが発生し、基地局において決定した変調方式が利用できずに、パケットロスが発生している。しかしながら、常に高い EPSNR が達成できている。したがって、提案手法は無線品質に関わらず個々の遅延を保証可能であり、超解像を行うことで高い映像品質を達成できる。

最後に、各車両における周波数帯域幅の時間平均と EPSNR を表 4.2 に示す。車両 1 の場合、提案手法は従来手法に比較して帯域幅を大きく利用せずにはほぼ同等の EPSNR となっている。提案手法では、システムで車両が送信する最大解像度である  $480 \times 270$  のフレームを送信するために必要な帯域幅は 5 MHz であり、効率的に帯域幅が利用できている。一方で従来手法は映像配信における解像度に必要な帯域幅が考慮されておらず、不要な帯域幅が割り当てられている。また、車両 2, 3 の場合、SNR が時間経過で変化するため、従来手法の EPSNR は提案手法と比較して小さくなる。従来手法では帯域使用率が SNR に比例するため、従来手法において遅延制約を満たすことができず一部のフレームの EPSNR が 0 となることで時間平均の EPSNR が低下する。そのため、提案手法では従来手法を上回る性能を有している。

車両 4 の場合、従来手法では十分な帯域幅を確保できておらず、常に最低解像度のフレームを送信しており、またそれでも遅延制約を満たすことができているため、時間平均の EPSNR がかなり低くなっている。一方で提案システムでは、ほかの車両と同様に高い EPSNR を維持できている。提案手法では、EPSNR を平均で 5.22 dB、最大で 17.345 dB をも改善することができた。

この結果から、提案システムは、無線品質の状況に応じて効率的な周波数帯域割り当てとフレーム解像度の決定を行うことで、おける安定した映像配信を実現すること可能である。

表 4.2: 各車両における時間平均の EPSNR と周波数帯域幅

	周波数帯域幅 [MHz]		EPSNR [dB]	
	従来手法	提案手法	従来手法	提案手法
Vehicle 1	8.673	5.000	25.524	25.524
Vehicle 2	4.766	5.000	22.825	25.516
Vehicle 3	5.178	5.000	24.681	25.524
Vehicle 4	1.383	5.000	6.8213	24.166
Total	20.00	20.00	79.551	100.73

## 4.5 結論

本章では協調型自動運転において車両が路側機に基地局を介して車両の走行映像を送信するアプリケーションを想定し、その映像伝送手法について説明し、性能評価を行った。自動運転における映像伝送はほかのアプリケーションよりも遅延制約が厳しく、従来のベストエフォート方式を用いた AVS 手法では、無線品質が劣化している場所においては遅延が増加する課題があった。提案手法では、車両が車両-基地局間のアップリンク通信における電波マップを所持しているとし、車両の走行ルート情報に基づいて SNR を予測、ビデオフレームの解像度を事前に決定することで無線品質が劣化した環境においても通信遅延が遅延制約以下であることを保証した基地局介入型映像伝送手法を提案した。提案手法では、無線品質に限らず常に高品質の映像を高信頼で送信できることを示した。

## 第5章

# 結論

協調型自動運転においてデータの信頼性を保証するために、複数の通信路を利用する MPQUIC や、路側機に映像を送信する場合では解像度を遅延に応じて変更する遅延保障型映像配信が提案されている。しかし、この手法ではそれぞれトランスポート層、アプリケーション層のみで観測できる情報に基づいて現在の無線品質を予測し、データの処理を行うため、構造物などで局所的に無線品質が劣化した場合、信頼性が損なわれる課題があった。MPQUIC では統計的な RTT に基づいてデータを送信する通信路を決定することで、信頼性を担保しているが、過去の統計的な情報と車両の位置における無線品質情報に線形性がない場合に遅延が増大し、パケットロスが生じてしまっていた。また、遅延保障型映像配信手法においても過去のビデオフレームにおける統計的な End-to-End 遅延を用いて送信するビデオフレームの解像度を決定するため、MPQUIC と同様の理由でパケットロスが生じてしまう課題があった。

2章では、任意の無線品質を入力とすることで遅延、パケットロスを出力する協調型自動運転シミュレータについて、その仕様を説明した。

3章では、トランスポート層において、測定した車両の統計的な無線品質情報に基づいて各通信路におけるパケットロスの発生確率を予測し、その値に基づいて通信路を決定する拡張した MPQUIC を提案し、従来手法と比較して信頼性について性能を評価した。提案手法は局所的に無線品質が劣化した場合においても、その地点におけるパケットロスの発生確率を無線品質情報より予測することで従来手法と比較して局所的に無線品質が劣化した地点においてもデータを送信できていることを示した。

4章では、アプリケーション層において、車両の無線品質情報により、基地局が予測した車両のデータレートに基づいて遅延が遅延制約を超えない解像度を事前に決定し、低下した解像度においては基地局で超解像を行うことで高信頼、高品質の映像配信を目的とす

る基地局介入型映像伝送手法を提案し、その性能を評価した。提案手法は従来手法と比較して、遅延制約を超過することによってパケットロスとなるビデオフレーム数がほとんどなく、常に高品質の映像を配信できることを示した。

# 謝辞

本研究は、電気通信大学大学院 情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻 須藤研究室において、須藤克弥助教のご指導の下で行われました。須藤克弥助教には、研究のアイデアや方針、取り組み方だけでなく、研究への姿勢に対する先生ご自身の考え方を親身にご指導いただきました。また、普段の生活におけるアドバイスやサポートも頂き、様々な面でご指導いただきました。心より感謝申し上げます。藤井 威生教授には、主任指導教員として研究対するご意見を頂きました。また課外活動を通じて実際に研究がどのような状況で利用されているのか見学する機会を頂き、研究に対する意欲が向上しました。心より感謝申し上げます。東京理科大学の佐藤 光哉助教には、論文を作成する上で、書き方のご指導や研究内容に対してご意見をいただきました。心より感謝申し上げます。また、須藤研究室の修士課程 2 年の橋本 理公さん、寺内 健さんには同学年として研究対する意見だけではなく、就職活動や普段の生活時において支えていただきました。感染症対策でほとんど大学に登校できない中、交流を深めることができるよう暖かく接していただきました。心よりお礼申し上げます。同じく須藤研究室の修士課程 1 年の坂内 信允さん、学部 4 年の藤井 和貴さん、美濃 夏貴さん、山田 準一朗さんには上学年としての接し方や研究内容や日々の生活を通じて新しい知識を教えていただきました。心よりお礼申し上げます。

# 付録 A

## 超解像モデルの学習と性能

### A.1 序論

本章では、提案する軽量化モデルの学習方法を説明し、従来の FRVSR モデルについて、出力される画像品質と超解像に要する処理遅延を比較する。

### A.2 超解像モデルの学習

超解像モデルのデータセットとして、ダッシュボードに設置したドライブレコーダーを用いて東京都内の道路を撮影した映像を用いる。撮影時の環境として、車両は時速 40 km で走行しており、フレームレートが 14 fps で解像度が  $1920 \times 1080$  の映像を走行中は常に撮影している。学習時には、撮影した映像を 120 フレームずつに分けた映像を、合計で 420 用意する。さらに、学習用にバイキュービックダウンサンプリングを用いて解像度を落としている。これらの高解像度映像と低解像度映像を用いて超解像モデルの学習を行う。

学習では初期パラメータとして Xavier の初期化を用いている。バッチサイズが 4、エポック 10 回のミニバッチ学習を採用しており、フレーム間の時間的連続性を学習するため、各入力フレームに対して 10 個の連続フレームをセットで使用する。最適化アルゴリズムには Adam を用いており、学習レートは  $5 \times 10^{-5}$  である。FNet の学習には、損失関数として平均二乗誤差 (MSE) を用いている。

$$\zeta = \|\mathbf{A}_v^i(t) - \text{WP}(\mathbf{A}_v^{i-1}(t), \text{FNet}(\mathbf{A}_v^{i-1}(t), \mathbf{A}_v^i(t)))\|_2. \quad (\text{A.1})$$

さらに、学習では Temporally coherent Generative adversarial network approaches (TecoGAN) [50] を採用し、FNet と SRNet を同時に学習している。



図 A.1: 超解像の例. 提案したモデルの出力はオリジナルの超解像モデルと似たフレームを出力できている.

表 A.1: 処理遅延と画像品質 (PSNR)

	処理遅延 [sec]	PSNR [dB]
Original FRVSR	0.124	25.646
Proposed SR	0.040	25.524

### A.3 超解像モデルの性能評価

提案する超解像モデルの性能を FRVSR [6] と比較する. 1 フレームを超解像するために必要な平均遅延と Peak signal-to-noise ratio (PSNR) を評価する. PSNR は以下のよう  
に定義する.

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left( \frac{\gamma^2}{\text{MSE}} \right), \quad (\text{A.2})$$

$\gamma$  はオリジナルの映像におけるフレーム数を示し, MSE はオリジナルの映像におけるフレームと超解像フレーム間における平均二乗誤差である. ここでは, 入力解像度を  $480 \times 270$  とし, 出力する解像度は  $1920 \times 1080$  である. 各超解像モデルは RTX2080 と Ubuntu18.04 を搭載した GPU サーバに Python3.7.4 と TensorFlow 1.14.0 によって実

装している。図 A.1 は超解像を行ったフレームを示している。FRVSR と提案手法はどちらもオリジナルの映像フレームに近い画像品質で出力できていることがわかる。表 A.1 は各 SR モデルの処理時間と PSNR を示したものである。どちらのモデルとも同じ程度の PSNR を達成することができているが、提案したモデルではオリジナルの FRVSR に比べて処理時間が 80 msec 削減できていることがわかる。これらの結果から、提案する超解像モデルは超解像時に低遅延で実行することが可能であり、遅延制約が厳しい遠隔監視において有効的であることが確認できる。

## A.4 結論

本付録では、提案した軽量化モデルが画像にもたらす影響を調査した。従来手法と比較し、軽量化モデルは残差ブロックを減らすことで画像品質が数 dB 低下しているが、それに対して処理遅延は 80 msec ほど削減できており、遅延制約以下の遅延を保証する必要がある自動運転においては有効的であることを示した。

## 参考文献

- [1] 3GPP TS 38.214. Nr; physical layer procedures for data. Technical report, ETSI, 2018.
- [2] Wireless Lan Professionals. MCS Table and How To Use it. <https://wlanprofessionals.com/mcs-table-and-how-to-use-it/>.
- [3] ISO 21217:2014. Intelligent transport systems — communications access for land mobiles — architecture. Technical report, 2014.
- [4] LTE TDD frame. [https://www.sqimway.com/lte\\_tdd.php](https://www.sqimway.com/lte_tdd.php).
- [5] A. Rabitsch and P. Hurtig. Evaluation of Packet Schedulers for Multipath QUIC. *Master's report*, pp. 1–141, Jun. 2018.
- [6] M. S. M. Sajjadi, R. Vemulapalli, and M. Brown. Frame-recurrent video super-resolution. In *Proc. CVPR*, pp. 6626–6634, Salt Lake, Utah, USA, Jan. 2018.
- [7] F. Constantin, et al. Internet controlled car. *Proc. COMM*, pp. 261–264, Jun. 2020.
- [8] C. Zhang, et al. Design of crawler mobile car with infrared remote control. *Proc. ICCAR*, pp. 430–434, Jun. 2020.
- [9] S. S. Shandrin and A. M. Ivanoc. Testing procedures and certification of highly automated and autonomous road vehicles. *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, pp. 1–5, Mar. 2021.
- [10] Y. Perk, J. Hyun Yang, and S. Lim. Development of complexity index and predictions of accident risks for mixed autonomous driving levels. *Proc. SMC*, pp. 1181–1188, Oct. 2018.
- [11] Z. Xu, et al. Formation control of car-like autonomous vehicles under communication delay. *Proc. CCC*, pp. 6376–6383, Dec. 2012.
- [12] T. Hara and R. Kiyohara. Vehicle approaching model for t-junction during tran-

- sition to autonomous vehicles. *Proc. ICOIN*, pp. 304–309, Apr. 2018.
- [13] T. Ömer Şahin, et al. Functional system architectures towards fully automated driving. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 304–309, Jun. 2016.
- [14] A. Kurt, et al. Poster abstract: Hierarchical hybrid-state systems for coordinated autonomous driving in mixed-traffic urban environments. *IEEE/ACM Third International Conference on Cyber-Physical Systems*, p. 230, Apr. 2012.
- [15] C. Huang and G. Nitschke. Evolutionary automation of coordinated autonomous vehicles. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1–7, Jul. 2020.
- [16] K. Wu, C. Liao, and W. Wu. Reliability and safety assessment of automated driving systems: Review and preview. *Proc. IEEM*, pp. 390–394, Dec. 2020.
- [17] N. A. Zaini, et al. Remote monitoring system based on a wi-fi controlled car using raspberry pi. In *Proc. ICSPC*, pp. 224–229, Bandar Hilir, Malaysia, Nov. 2016.
- [18] W. Sun, C. Liu, and J. Zhu. A remote controlled mobile robot based on wireless transmission. In *Proc. IEEE IMCEC*, pp. 2173–2176, Xi’an, China, May. 2018.
- [19] F. Civerchia, et al. Remote control of a robot rover combining 5g, ai, and gpu image processing at the edge. In *Proc. OFC*, pp. 1–3, San Diego, CA, USA, Mar. 2020.
- [20] K. Mizushima, T. Kamikura, and M. Omae. Evaluation of influence of delay of image information on steering maneuver in remotely controllable automated driving system. *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol. 50, No. 3, pp. 970–976, May. 2019.
- [21] Y. Li and C. Pan. Cooperative spacing control for autonomous vehicle platoon with input delays. *Proc. CCDC*, pp. 6238–6243, May. 2016.
- [22] Y. Li, et al. Cooperative spacing control for interconnected vehicle systems with input delays. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, No. 12, pp. 10692–10704, Dec. 2017.
- [23] Y. Liu, et al. Multipath extension for quic. *Quic Working Group*, Oct. 2021.
- [24] H. Jung, et al. Reliability verification procedure of secured v2x communication for autonomous cooperation driving. *Proc. ICTC*, pp. 1356–1360, Oct. 2018.
- [25] I. Rundas and T. Haidegger. Verification, trustworthiness and accountability of human-driven autonomous systems. *Proc. ICAS*, pp. 1–1, Aug. 2021.
- [26] Multipath TCP Linux Kernel. <https://www.multipath-tcp.org/>.

- [27] Q. De Coninck and O. Bonaventure. Multipath quic: Design and evaluation. *Proc. 13th CoNext'17*, pp. 160–166, Nov. 2017.
- [28] J. Wu, et al. Enabling adaptive high-frame-rate video streaming in mobile cloud gaming applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 25, No. 12, pp. 1988–2001, Jun. 2015.
- [29] M. H. Park, J. Choi, and J. K. Choi. A network-aware encoding rate control algorithm for real-time up-streaming video services. *IEEE Communications Letters*, Vol. 21, pp. 1653–1656, Jul. 2017.
- [30] S. Watanabe, et al. Traffic reduction in video call and chat using dnn-based image reconstruction. *Proc. ICC*, May. 2019.
- [31] K. Sato, K. Inage, and T. Fujii. On the performance of neural network residual Kriging in radio environment mapping. *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 94557–94568, Jul. 2019.
- [32] Z. Li, et al. Position-driven wireless multipath channel simulator for square-shaped environments. *1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications Sensing*, pp. 1–6, Mar. 2021.
- [33] I. Aouichak, et al. Multipath model simulator for plc home networks. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, pp. 1–5, Sep. 2017.
- [34] K. Phejrsulsai and S. Pattaramalai. Performance comparison of multipath tcp data transferring in bottleneck and disjoint-path wired networks connected with wi-fi. *International Electrical Engineering Congress*, pp. 1–4, Mar. 2017.
- [35] 大久保尚人, ウメシュアニール, 岩村幹夫. 高速・大容量・低遅延を実現する LTE の無線方式概要. *Docomo technology reports*, pp. 11–19, 2010. [https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical\\_journal/bn/vol19\\_1/vol19\\_1\\_011jp.pdf](https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol19_1/vol19_1_011jp.pdf).
- [36] M. Wang, Z. Zhong, and Q. Liu. Resource allocation for sc-fdma in lte uplink. *Proc. ICSO*, pp. 601–604, Jul. 2011.
- [37] Navita and Amandeep. Performance analysis of ofdma, mimo and sc-fdma technology in 4g lte networks. *Proc. Confluence*, pp. 554–558, Jan. 2016.
- [38] N. Masataka, et al. Improving bufferbloat problem of TCP communication by MAC transmission limitation at IEEE 802.11n access point. *IEICE Technical Report*, Vol. 115, No. 206, pp. 113–118, Aug. 2015.

- [39] 今井悟志ほか. 車車間通信サービスにおける CSMA/CA 通信品質の解析. 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 3, pp. 914–929, Mar. 2010.
- [40] S. Kim, B. Kim, and Y. Fang. Downlink and uplink resource allocation in ieee 802.11 wireless lans. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 54, No. 1, pp. 320–327, Jan. 2005.
- [41] X. Qiao, B. Wu, and T. Ye. Qos-aware a-mpdu retransmission scheme for 802.11n/ac/ad wlans. *IEEE Communications Letters*, Vol. 21, No. 10, pp. 2290–2293, Jul. 2017.
- [42] M. Kowsar and S. Biswas. Performance improvement of ieee 802.11n wlans via frame aggregation in ns-3. *Proc. ECCE*, pp. 1–6, Feb. 2017.
- [43] J. Iyengar and M. Thomson. RFC 9000 QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport. *Omtermet Emgomeeromg Task Force*, May. 2021.
- [44] C. Paasch, et al. Multipath TCP in the Linux Kernel. 2009-2017. <http://www.multipath-tcp.org>.
- [45] S. Mercan and A. Zreikat. Statistical Analysis of Packet Delay Time and Variation on the Internet. *Proc. CCWC*, pp. 695–700, Oct. 2019.
- [46] K. Hujimoto, S. Ata, and M. Murata. Statistical analysis of packet delays in the Internet and its application to playout control for streaming applications. *IEEE*, Vol. E84-B, No. 6, pp. 1504–1512, Jun. 2001.
- [47] H. Mao, R. Netravali, and M. Alizadeh. Neural adaptive video streaming with pensieve. In *Proc. SIGCOMM*, p. 197–210, Los Angeles, CA, USA, Aug. 2017.
- [48] R. Mo and Y. H. Chew. Capacity and throughput for transmission over flat fading channels employing snr-priority-based channel allocation scheme. *Proc. IEEE GROBECOM*, Dec. 2003.
- [49] Giriraja C V and T K Ramesh. Snr based master-slave dynamic device to device communication in underlay cellular networks. *Proc. ICACCI*, pp. 2114–2117, Aug. 2015.
- [50] M. Chu, et al. Learning temporal coherence via self-supervision for gan-based video generation. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 39, No. 75, Nov. 2018.

# 発表文献リスト

- [1] Kohei Kato, Katsuya Suto, Koya Sato “Deterministic Video Streaming with Deep Learning Enabled Base Station Intervention for Stable Remote Driving System,” ICC 2021 Workshop on Time-sensitive and Deterministic Networking, Online, Mar. 2020, 6page.
- [2] 加藤耕平, 須藤克弥, “車両遠隔監視における基地局介入型映像伝送手法,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-6-1, 2021年09月15日, 1ページ.