

# CARMUI-NET：自動運転車遠隔監視のためのバーチャル都市プラットフォームにおける通信品質変動機能の開発と評価

秋葉 貴文<sup>1</sup> 清水 怜良<sup>1</sup> 井上 慎之助<sup>1</sup> 金子 直矢<sup>2</sup> 牧野 仁宣<sup>2</sup> 湯村 翼<sup>1</sup>

**概要：**公道での走行が始まったレベル4自動運転車は、運転者が乗車しない場合に遠隔監視が必要である。遠隔監視システムのUIは監視を容易にするために改善が必須だが、自動運転車の実機を使った開発はコストやリソース面で困難である。我々は、以前の研究において、3DCGで構築したバーチャル都市を活用して自動運転車遠隔監視システムのUI検討を行うプラットフォームCARMUIを開発した。実際の遠隔監視システムでは、自動車との通信は、ローミングや周辺の混雑状況などの様々な要因によって品質が変化する。そのため、CARMUIにおいても通信品質の変化を考慮することが求められる。そこで本研究では、CARMUIに通信品質変動機能を追加したプラットフォームCARMUI-NETを開発する。CARMUI-NETの設計および実装を行い、通信品質変動機能の性能と有効性を評価した。また、通信品質変動の影響を考慮した模擬評価実験を実施した。

**キーワード：**シミュレーション, 自動運転, 通信品質

## 1. はじめに

自動運転車の普及が全世界的に進む。日本では、「自動運転レベル4等先進モビリティサービス研究開発・社会実装プロジェクト [1]」において、運転者を必要としないレベル4自動運転車が初めて認可され、2023年5月より福井県永平寺町で運行が実施された。レベル4自動運転車には遠隔監視が必要であり、永平寺町の運行では遠隔監視システムが導入された。レベル4自動運転車の運行は始まったばかりであり、遠隔監視システムのユーザインタフェース (UI) にはさまざまな改善の余地がある。永平寺町の運行では1台の自動運転車を監視しているが、将来的には複数の自動運転車を同時に監視することも想定される。しかしながら、遠隔監視システムのUI改善を行うために、自動運転車の実機を運行することは、コストやリソースの面で困難である。そこで以前の研究において、3次元コンピュータグラフィックス (3DCG) で構築したバーチャル都市を用いて、自動運転車遠隔監視システムのUI検討を行うバーチャル都市プラットフォームCARMUI (CAR Monitoring virtual platform for designing User Interface) を開発を行った。自

動運転車の学習のための3DCG環境としてAirSim[2]やAWSIM[3]が存在するが、現実に即したバーチャル都市を用いてUI検討ができるよう、PLATEAU[4]を用いて実在する都市のモデルを独自に開発した。遠隔監視システムはWebサービスとして実装し、Webブラウザ上で閲覧可能である。UI検討を目的として、複数の自動車の画面を個別のウィンドウに表示し、任意の位置に配置できる機能を提供する。実際の遠隔監視システムでは、自動車との通信にモバイル回線を用いるため通信品質は非常に変化しやすい。通信品質の変動は、ローミングによる一時的な接続不良や遅延や周囲の混雑によるネットワークの輻輳、さらに地域ごとの通信インフラの違いなど複数の要因によって引き起こされる。奥永源寺で2021年4月に開始した社会実験 [5] では、走行ルートの一部で通信状況が悪く位置情報やカメラ画像の途切れが発生していることが報告されている。そのためCARMUIにおいても通信品質を考慮することが求められる。そこで本研究では、CARMUIに通信品質変動機能を追加したプラットフォームCARMUI-NETの開発する。本論文では、CARMUI-NETの設計と実装を行い、通信品質変動機能の性能と有効性の評価結果及び、通信品質の変動の影響を考慮した模擬評価実験を実施した結果を述べる。

<sup>1</sup> 北海道情報大学

<sup>2</sup> トヨタ自動車

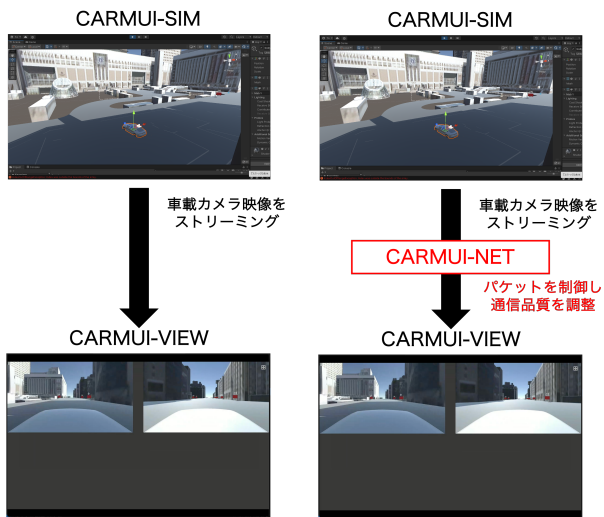


図 1 CARMUI : 概要図

## 2. CARMUI

### 2.1 概要

図 1 に CARMUI の概要図を示す。CARMUI は、自動運転車の模擬データを生成する CARMUI-SIM と、UI を検討する模擬監視システム CARMUI-VIEW、通信品質を変動させる機能を提供する CARMUI-NET で構成される。CARMUI-SIM のバーチャル空間にて、仮想的に自動運転車を走行させる。自動運転車にカメラを取り付け、その車載カメラ映像を CARMUI-VIEW へビデオストリーミングする。CARMUI-VIEW は、CARMUI-SIM から受け取った車載カメラ映像を、Web ブラウザで閲覧できるようにする。CARMUI-NET は、CARMUI-VIEW を実行するコンピュータのネットワークインターフェースを利用し、パケットを制御することで通信品質を動的に調整する。

### 2.2 CARMUI-SIM

CARMUI-SIM はゲームエンジン Unity を用いて構築した。都市の建物モデルには PLATEAU を用い、PLATEAU SDK for Unity を用いて Unity にインポートした。本論文の実装では、札幌駅前の建物モデルを用いた。カメラを自動運転車に紐づけたため、車載カメラのように振る舞う。自動運転車は決められたルートを通るよう実装した。CARMUI-VIEW へのビデオストリーミングは、Unity Render Streaming[6] というパッケージを用いて、WebRTC にて行う。

### 2.3 CARMUI-VIEW

CARMUI-VIEW は、Web ブラウザで閲覧可能な Web サービスとして実装した。ビデオストリーミングには Unity Render Streaming を使用し、付属の受信サンプルプログラムを CARMUI-VIEW として利用するために、フロン

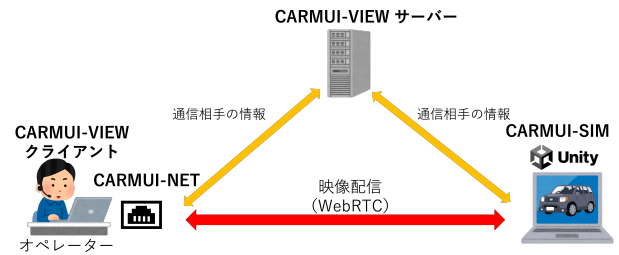


図 2 CARMUI システム構成図

トエンドのプログラムを改良した。本論文では、2本のビデオストリーミングを受信し、それぞれを個別のウィンドウに表示する。これらのウィンドウは、マウスでドラッグして任意の位置に配置できる。また、本論文では、CARMUI-VIEW をクライアントの Web ブラウザで動作する CARMUI-VIEW クライアントと、Web サーバーとして動作する CARMUI-VIEW サーバーに区別する。

### 2.4 CARMUI-NET

CARMUI-NET は、CARMUI-VIEW を実行するクライアントのネットワークインターフェースを利用し、パケットを制御することで通信品質を動的に調整するように設計・実装した。この機能は、Linux のネットワークトラフィック制御ツールである tc (traffic control) コマンドを使用し、任意のパラメータを指定することで通信品質の変動を再現している。本論文では、事前に用意したネットワークパラメータを tc コマンドで手動実行し、ネットワーク品質の変動を再現した

## 3. 設計

CARMUI のシステム構成図を図 2 に示す。CARMUI-VIEW クライアントは、CARMUI-VIEW サーバーを介して、CARMUI-SIM との通信に必要な IP アドレスなどの情報を交換する。情報交換後、CARMUI-VIEW クライアントと CARMUI-SIM の間で、WebRTC を用いた映像配信が行われる。この間、CARMUI-NET は CARMUI-VIEW クライアントが受信するすべてのパケットを制御し、通信品質の動的な調整を実現する。

CARMUI-NET は、CARMUI-VIEW を実行するクライアントのネットワークインターフェースを利用し、tc コマンドを使用してパケット制御機能を実装する。そのため、本機能を利用するには、CARMUI-VIEW を実行するクライアントで tc コマンドが使用可能であることが必須条件となり、クライアントの OS として Linux を前提としている。tc コマンドは、デフォルトでは受信 (ingress) 側のトラフィックを直接制御する仕組みを持たない。これは、Linux において受信トラフィックに遅延やパケットロス適用するための標準的なキューが存在しないためである。この制約を解決するために、仮想デバイス ifb を作成して

有効化し、物理インターフェースに ingress qdisc とフィルタ（例：action mirrored egress redirect dev ifb0）を設定する。これにより、受信データを ifb にリダイレクトできる。最終的に、ifb 側で netem を適用することで、送信トラフィックと同様に、受信トラフィックにも遅延やパケットロスをエミュレートできる。

## 4. 評価実験

### 4.1 概要

本研究では、通信品質変動機能の性能と有効性の評価、および監視システムが実際の状況を適切に再現できているかを検討することを目的に、2つの評価実験を実施した。

### 4.2 性能と有効性の評価

CARMUI-NET による通信品質変動機能の性能と有効性を評価するため、CARMUI-SIM で動作する車を操作しながら、CARMUI-VIEW クライアントに表示される映像を観察し、ネットワークの遅延や映像の変化を評価する実験を行った。実施したタスクでは、CARMUI-VIEW クライアントの画面をディスプレイに映し出し、CARMUI-SIM の仮想環境上で車を操作した。これにより、キー入力による操作の遅延やパケットロスによる映像の乱れを体感することが可能となった。本評価実験は、ネットワークの専門知識を有する大学院生および教員を対象に実施した。評価実験開始前には、通信品質変動のない映像を基準（表3：パターン0）として操作を行い、その後、各映像パターンにおける通信品質変動の内容とパラメータを提示した上で操作を実施した。通信品質変動機能の性能評価では、パターン0を基準とし、パターン1から5の通信品質について操作を行ってもらった。実験終了後には、参加者に Google フォームを用いたアンケート（表1）に回答してもらい、得られた意見を基に性能と有効性の評価を行った。

### 4.3 模擬評価実験

通信品質の変動が発生している状態で、監視システムが実際の状況を適切に再現できているかを検討する模擬評価実験を実施した（図5）。画面表示は横並びにして状態で実施した（図4）。タスクでは、旗の上部に表示された数字を基に、奇数と偶数の旗の数をそれぞれカウントした（図3）。以前の評価実験では、数字を目視でチェックする方法を採用していたが、手元を見る時間に大きく依存する課題があった。この問題を解決するため、手元に2台のカウンターを設置し、操作の効率を向上させた。さらに、タスクの難易度を下げることで正答率を向上させ、ネットワーク品質の変動が映像に与える影響をより調査しやすくなると考えた。模擬評価実験では、5種類のパラメータ（表3：パターン1から5）を設定した映像を視聴してもらった。タスク終了後には、参加者に Google フォームを用いたアン

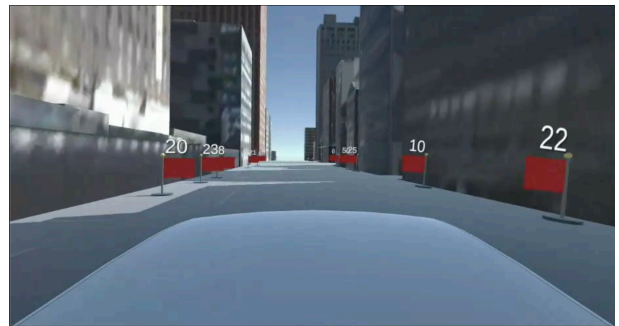


図3 CARMUI-SIM の走行コース脇に立てられた旗

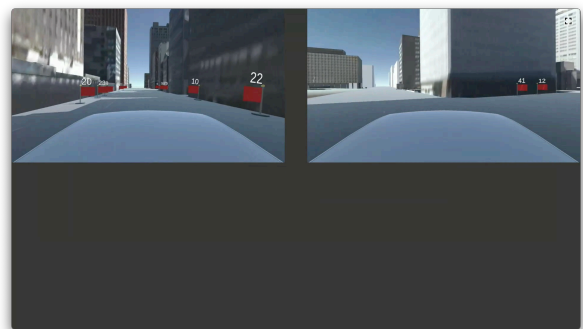


図4 CARMUI-VIEW のウィンドウ左右配置



図5 模擬評価実験の様子

ケートを実施（表2）し、映像の変化や操作の影響に関する意見を収集した。

### 4.4 通信品質変動のパラメータ

本評価実験で使用したネットワークパラメータを表3に示す。パターン1は、複数回線を冗長併用する通信技術の WebRTC 映像伝送への適用と評価 [7] から、実測値の平均値および RTT を参考に決定した。また、パターン2と3はロスが大きい条件、パターン4は遅延が大きい条件、パターン5は遅延とロスの双方が大きい条件をそれぞれ設定した。

表 1 性能と有効性の評価についてのアンケート項目

番号	質問	選択肢
Q1	自動車の運転頻度を教えてください？	ほぼ毎日/週に3～4回程度/週に1～2回程度/月に数回/ほとんどしない(免許あり)/免許なし
Q2	自動車の移動スピードをどう感じましたか？	1. とても遅い～5. とても速い
Q3	ネットワーク品質の変化による操作性への影響を感じましたか？	1. 操作が非常に難しくなった～5. 変化は感じなかった
Q4	上記の影響を最も感じたパターンを選んでください	パターン0/パターン1/パターン2/パターン3/パターン4/パターン5/
Q5	映像と車両の操作タイミングが一致していないと感じることはありましたか？	1. 操作が非常に難しくなった～5. 変化は感じなかった
Q6	上記の影響を最も感じたパターンを選んでください	パターン0/パターン1/パターン2/パターン3/パターン4/パターン5/
Q7	ネットワーク品質が低下したとき、映像の視認性にどの程度影響がありましたか？	1. 非常に影響があった～5. 影響は全くなかった
Q8	上記の回答の理由があれば教えてください	自由記述
Q9	本システムは、ネットワーク品質が低下している状況下でも十分に役立つと思えますか？	1. 全く役に立たない～非常に役に立つ
Q10	上記の回答の理由があれば教えてください	自由記述
Q11	遅延の変化による操作への影響をどのくらいどのくらい感じることができましたか？	1. あまり影響を感じなかった～5. とても影響を感じた
Q12	上記の回答の理由があれば教えてください	自由記述
Q13	ロス率の変化による操作への影響をどのくらい感じることができましたか？	1. あまり影響を感じなかった～5. とても影響を感じた
Q14	上記の回答の理由があれば教えてください	自由記述
Q15	ネットワーク品質が低下した場合に、どのような通知や補助機能があると便利だと思いますか？(例: 映像の自動解像度調整 / ネットワーク品質のリアルタイム通知 / 他)	自由記述
Q16	今後追加してほしい機能や改善案があれば教えてください	自由記述
Q17	実験を通じて気づいたことやコメントがあればなんでもご記入ください	自由記述

表 2 模擬評価実験についてのアンケート項目

番号	質問	選択肢
Q1	自動車の運転頻度を教えてください？	ほぼ毎日/週に3～4回程度/週に1～2回程度/月に数回/ほとんどしない(免許あり)/免許なし
Q2	自動車の移動スピードをどう感じましたか？	1. とても遅い～5. とても速い
Q3	旗を数えやすいと感じた映像を全て選択してください	映像1/映像2/映像3/映像4/映像5
Q4	旗を数えやすかった理由があれば教えてください	自由記述
Q5	旗を数えにくかった理由があれば教えてください	自由記述
Q6	こん実験ではCGのシュミレータの画面を実際の手車載カメラを監視しているような感覚は得られましたか？	1. CGなので実際の手車載カメラとは違った～5. 実際の手車載カメラを監視している感覚があった
Q7	実験を通じて気づいたことやコメントがあればなんでもご記入ください	自由記述

#### 4.5 CARMUIの実験環境

CARMUI-VIEW クライアントでは、2つの画面を横並びに配置し、それぞれに異なる車載カメラの映像を出力した。また、CARMUI-VIEW クライアントは、ロスや遅延が大きく増加すると映像配信のセッションが自動で切断される仕様となっている。そのため、切断が発生した際には手動で再接続を行った。さらに、CARMUI-SIMで動作する車のスピード調整も実施した。以前の研究結果から、車

の移動スピードが速すぎるものが課題として挙げられていたため、約14 km/hになるようパラメータを調整した。

## 5. 結果

### 5.1 性能と有効性の評価

Q3. 「ネットワーク品質の変化による操作性への影響を感じましたか？」では、平均値が2であった。Q5「映像と車両の操作タイミングが一致していないと感じることはあ

表 3 設定した通信品質のパラメータ

番号	スループット (Mbps)	遅延 (ms)	ロス (%)
パターン 0	none	none	none
パターン 1	3	60	1.1
パターン 2	5	30	5
パターン 3	5	30	10
パターン 4	5	200	1
パターン 5	5	200	5

りましたか」では、平均値が 1.66 であった。これらの結果は遅延による操作感覚への影響が大きと考えられる。また、Q3, Q5 ともに影響を最も感じたパターンとしてパターン 6 が挙げられた。

Q7「ネットワーク品質が低下したとき、映像の視認性にどの程度影響がありましたか？」では、平均値が 3.66 であった。理由として、「画質の低下というように感じるものが希にあったが、全体としてはそれほど影響なかったと感じたので。」という意見が挙げられた。Q9「本システムは、ネットワーク品質が低下している状況下でも十分に役立つと思いますか？」では、平均値が 2.66 であった。理由として

- 映像が完全に途切れるという感じや、暗転するようなことはなかったので、「監視」ということであれば十分機能すると思える。
- 再接続が必要になるのであれば、自動化してほしいという意見が挙げられた。

Q11「遅延の変化による操作への影響をどのくらいのくらい感じることができましたか？」では、平均値が 4.66 であった。理由として

- 遅延だけでなくロストの組み合わせでかなり反応が悪くなるがあった。最悪の組み合わせ (6 の場合) だとレスポンス低下とフレーム飛びが重なったと感じることもあった。
- キーを押してから遅延があると、違和感が強いという意見が挙げられた。

Q13「ロス率の変化による操作への影響をどのくらい感じることができましたか？」では、平均値が 3 であった。理由としては、

- 画像のカクつき (フレーム飛びか) を感じることはあったが、やはり「監視」という観点であればそれほど問題ではないのかと思う。
- 画面がかくつく、時々止まるためという意見が挙げられた。

性能と有効性の評価実験では、CARMUI-VIEW クライアントに表示された映像を見ながら、CARMUI-SIM で動作する車を直接操作してもらった。このため、通信品質の変動が操作に大きな影響を与えたと考えられる。特に遅延の影響が顕著であった。また、CARMUI-VIEW の実装で

は、ロス率が上昇した際に映像配信が自動的に切断される仕様となっている。このため、ロス率による映像品質への影響が抑えられ、ロス率の影響を被験者があまり感じなかったと考えられる。

## 5.2 模擬評価実験

図 6 に、パターンごとの正解数との誤差を示す。値がマイナスである部分は、被験者の回答が正解数を上回ったことを示している。この誤差は、被験者が同じ数字を複数回カウントやカウンターの操作ミスが原因と考えられる。パターン 1 では、被験者全員の正答数との誤差が大きかった。これは、初回のタスクで被験者がタスクに慣れていなかったことが原因と考えられる。パターン 3 では、被験者全体の正答率との誤差が大きくなった。しかし、被験者ごとの正答率を分析すると、タスクを繰り返すにつれて誤差が減少する傾向が見て取れる。これらの結果から、タスクへの慣れが誤差の減少に大きく影響していると考えられる。

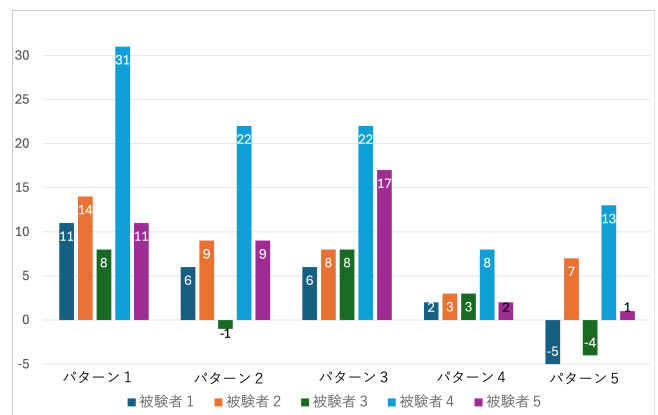


図 6 被験者の回答とタスク正答数の差

Q3「旗を数えやすいと感じた映像を全て選択してください」の結果を図 7 に示す。Q4「旗を数えやすかった理由があれば教えてください」では、「逆にカクつきがゆえに一瞬の見逃しをなくすことができたから。」という意見が上がった。Q5「旗を数えにくかった理由があれば教えてください」では、「初めは慣れの問題で、3 番目は途中ロスパケ (の演出) があった他そもそも荒く、数えにくいと感じた。」という意見があった。

Q6「実験では CG のシュミレータの画面を実際の車載

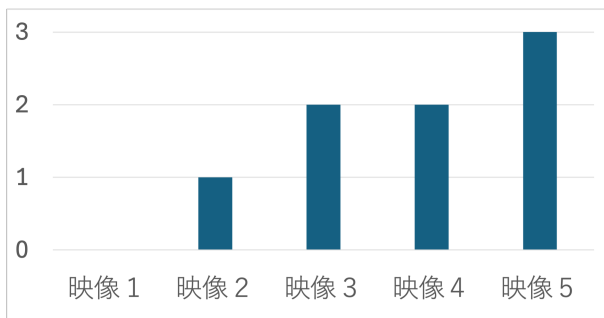


図 7 模擬評価実験アンケート Q3 の解答結果

カメラを監視しているような感覚は得られましたか？」では、平均値が 2.8 であった。

Q7「実験を通じて気づいたことやコメントがあればなんでもご記入ください」では、

- 2 映像を同時に見る事自体が難しいと感じた。また、低品質通信では監視がしにくいと感じた。今回は CG だなと感じたが、実際のカメラを監視する方が難しくなるのではないかと思った。
- カクつくから答えられるというのは、リアルの車ではもう事故が起きている可能性が高く危ないため、多少目が慣れていない人がやらないと危ないのではと思った。

といった意見があった

模擬評価実験では、タスクの実施後、アンケートによる主観評価と結果に基づく定量的評価を行った。その中で、通信品質が悪化した際、CARMUI-VIEW クライアントでフレーム飛びが発生し、実際の用途を考えると危険の把握が困難になるとの意見があった。このため、映像の停止を防ぐことを優先し、通信品質の低下時に UI でどのように情報を提示するかを検討する必要がある。

## 6. さいごに

本論文では、自動運転車遠隔監視システムの UI 検討を行うバーチャル都市プラットフォーム CARMUI に通信品質変動機能 CARMUI-NET の設計と実装を行い、それをを用いて性能と有効性の評価実験と通信品質変動の影響を考慮した模擬評価実験を実施した。性能と有効性の評価実験では、ネットワーク知識を有する大学院生及び教員を対象にアンケートによる主観評価を実施した。CARMUI-VIEW の仕様により、ロス率が上昇した際にフレーム飛びの発生や映像配信の切断が起こった。実際の遠隔監視システムでは、映像配信を最優先とすることが安全性の確保につながる。そのため、ブロックノイズの発生や自動解像度調整を許容してでも、映像配信を途切れさせないことが求められる。今後は、CARMUI-VIEW の通信切断処理を見直し、映像配信を継続する仕組みを検討する必要がある。模擬評価実験では、アンケートによる主観評価に加え、旗上部に表示される数字の部類タスクを被験者に貸す形で定量的な評価を実施した。しかし、このタスクでは、実際の遠隔監

視における突然のリスク回避や異常の発見といった状況を再現することができない。そのため、今後は遠隔監視システムの目的に合致したタスクの設計を検討する必要がある。

CARMUI では、複数の車載カメラ映像を画面に映し出すことができる。しかし、今回実装した CARMUI-NET では、CARMUI-VIEW クライアントが受信するすべてのパケットに対して通信品質の低下を引き起こすため、画面ごとに異なる通信品質の低下を再現することはできない。

実際の遠隔監視システムでは、車ごとに通信品質が異なることが想定される。そのため、CARMUI-NET においても、車ごとに通信品質を変動させることができるような実装を検討する必要がある。

## 参考文献

- [1] 横山利夫, 胡内健一, 新谷幸太郎. 自動運転レベル 4 等 先進モビリティサービス研究開発・社会実装プロジェクト (road to the 14) の紹介. IATSS Review (国際交通安全学会誌), Vol. 48, No. 2, pp. 88–96, 2023.
- [2] S. Shah, D. Dey, C. Lovett, and A. Kapoor. Airsim: High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles. In *Field and Service Robotics: Results of the 11th International Conference*, pp. 621–635. Springer, 2018.
- [3] Awsim. Accessed: 2025-01-27.
- [4] Plateau. Accessed: 2025-01-27.
- [5] 渡部康祐, 寺本英二, 三田亮平, 加藤宣幸. 自動運転サービスの横展開を支える支援システムの開発. SIP 成果報告書, Vol. 2021, No. 1, pp. 124–128, 2021.
- [6] Unity render streaming. Accessed: 2025-01-27.
- [7] 金子直矢, 伊東孝紘, 勝田肇, 渡辺敏暢, 阿部博, 大西亮吉ほか. 複数回線を冗長併用する通信技術の webrtc 映像伝送への適用と評価. 情報処理学会論文誌デジタルプラクティス (TDP), Vol. 3, No. 3, pp. 21–31, 2022.