HORUS Monitor：ヘッドマウントディスプレイを用いた自動運転車遠隔監視システムの提案

橋本 空輝[1]　清水 怜良[1]　金子 直矢[2]　牧野 仁宣[2]　湯村 翼[1,a)]

概要：レベル 4 自動運転の社会実装において，遠隔監視員による安全確認が義務付けられる．しかし，従来の物理モニターを複数台用いた監視環境は，設備の移動が困難であるため監視場所が限定されることや，監視員ごとの身体的特徴や好みに合わせてレイアウトを変更することが容易ではないという課題があった．そこで本研究では，監視用モニタを任意の位置に配置できる遠隔監視システム HORUS Monitor を提案する．HORUS Monitor は，車両からの映像をストリーミングし，ヘッドマウントディスプレイのパススルー機能を活用して任意の位置のモニタ上に表示する．これにより，物理的な設備に依存することなく，場所を選ばずに，かつ個々の監視員に最適化された柔軟な監視環境の構築が可能となる．

キーワード：自動運転車，ヘッドマウントディスプレイ，XR

1. はじめに

自動運転車の社会実装に向けた取り組みが進む．レベル 4 自動運転車は，運転者が車内に搭乗しないことを前提とした運行形態であり，異常時や判断困難な場面に備えて，遠隔地の人間オペレーターによる監視と介入支援が必要とされる．Waymo[1] をはじめとした自動運転事業者は，現場オペレーターによる遠隔支援システムを構築し，走行継続の可否判断や障害物回避支援などを人間が行う運用が採られる．遠隔監視員は，車両から送信される複数のカメラ映像やセンサ情報を確認しながら，必要に応じて非常停止などの判断を行う．そのため，遠隔監視環境には高い視認性と操作性，および長時間利用に耐えうる作業快適性が要求される．

現在の遠隔監視環境では，複数台の物理ディスプレイを机上やラックに設置し，それぞれに車両映像を表示する構成が一般的である．しかし，このような環境は設備の移動が困難であり，監視場所が特定の部屋や施設に限定されるという問題がある．また，モニターの配置や高さ，視距離などを監視員ごとに細かく調整することは難しく，身体的特徴や作業姿勢の違い，個人の好みに十分対応できていない．これらの制約は，作業負担の増大や監視品質の低下につながる可能性がある．

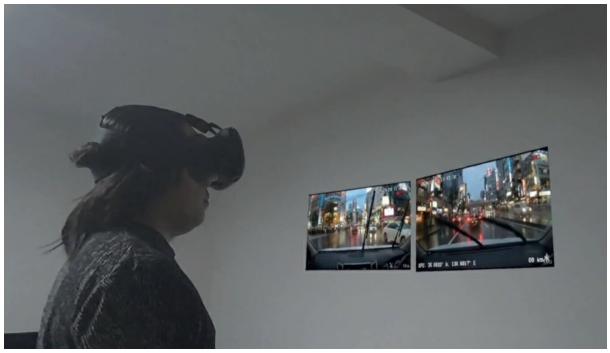


図 1: HORUS Monitor のコンセプト．

そこで本研究では，物理的なディスプレイに依存せず，監視用ディスプレイを任意の位置に配置可能な遠隔監視システム HORUS Monitor を提案する（図 1）．HORUS Monitor は，ネットワーク経由でストリーミングされる車両からの映像を，ヘッドマウントディスプレイ（HMD）のパススルー機能を用いて，実空間上の任意の位置にバーチャルディスプレイとして重畳表示する．これにより，監視員は自らの視界内に複数のバーチャルディスプレイを自由に配置し，位置，大きさ，角度を柔軟に調整できる．本手法により，監視場所の制約を受けない柔軟な運用が可能となるとともに，監視員個々の身体的特徴や好みに合わせた監視環境の構築が実現される．

[1] 北海道情報大学
[2] トヨタ自動車
[a)] yumu@yumulab.org

© 2018 Information Processing Society of Japan

2. 関連研究

2.1 自動運転車遠隔監視のユーザインタフェース

遠隔監視オペレーターが使用するユーザインタフェース（UI）の設計は，自動運転の運行安全を支える重要な要素である [2]．遠隔オペレーターは現地に存在しないため，車載カメラ映像とセンサデータから状況認識を行う．必要な情報を適切に提供することが UI 設計において重要である．

これまでの研究では，UI に表示すべき情報の種類や優先順位の整理が試みられている．Graf and Hussmann[3] は，テレオペレーションに必要とされる情報要素を網羅的に抽出し，80 項目から 20 項目へと絞り込む手法を用いて，物体検知，走行経路，車両位置情報などの優先提示項目を明示した．Tener and Lanir[4] は，遠隔運転におけるインタフェース設計上の課題を包括的に整理し，地図表示や周囲情報の重畳，警告提示といった GUI 要素の設計指針を提示している．Lindgren *et al.*[5] は，GUI プロトタイプのユーザ評価を通じて，情報の階層化，色による強調表示，および緊急時の情報切り替え方針がユーザの判断効率に影響することを明らかにしている．

国内の実運用事例としては，2023 年に永平寺町で開始された日本初のレベル 4 自動運転 [6] や，高速道路上の自動運転トラックの異常時遠隔対応実証 [7] が挙げられる．後者では，大雨環境下でも鮮明な映像伝送と遠隔判断によって，安全な停車および現場連携が可能であることが確認された．

2.2 HMD を用いたバーチャルディスプレイ提示

従来の監視環境は，物理モニタを固定配置し，監視員の前方に画面群を展開する構成であった．XR 技術を活用し，HMD を用いて仮想的に複数の情報提示領域を視界内に配置するアプローチも研究される．HMD を用いることで，監視員は自身の身体や姿勢，空間環境に応じてバーチャルディスプレイを任意の位置や大きさで配置できる柔軟な UI 構成が実現可能となる．

HMD 型インタフェースの有効性に関する初期的な検討として，Bout *et al.*[8] は，共有型自動運転車の遠隔オペレーター向けに HMD UI を試作し，従来型モニタ提示との比較評価を行った．その結果，HMD 使用時には被験者の空間的状況認識が向上し，周囲環境をより直感的に把握できる可能性が示された．また，Bouzón *et al.*[9] は，視覚情報に加えて，聴覚および触覚フィードバックを統合したマルチモーダル UI を提案し，没入環境下での操作満足度や制御感の向上を報告している．これらの成果は，HMD が単なる映像提示デバイスを超えて，状況理解を支援するツールとして有効であることを示す．

HMD を用いたバーチャルディスプレイ提示においては，複数の情報ウィンドウをどのように配置・設計するかがユーザビリティを左右する要因である．Daeijavad and Maurer のレビュー研究 [10] は，XR 環境における仮想ディスプレイのレイアウトに関する 14 件の実証研究を対象に分析し，

- 仮想画面はユーザのパーソナルスペース内に配置する方が視認効率が高い
- 水平方向の画面配置は不快感や身体的負担を引き起こす可能性がある
- 垂直方向の画面配置は視野内の情報分離に有効であり，生産性タスクにおいても好まれる傾向がある
- 配置はタスク種類に応じて動的に調整可能な設計が望ましい

といった知見を得た．

また，仮想モニタのサイズに関しても，現実の物理モニタと同等〜1.5 倍程度の大きさが視線移動の負荷や焦点調節の負担を最小化できる最適域であるとされる．巨大なディスプレイは没入感を高める反面，情報密度の調整や視認性の維持が困難となるため，複数画面の中で重要情報に焦点を当てた構成が望ましいとされる．

実証研究としては，Pavanatto *et al.*[11] が AR-HMD に複数の Office 作業用バーチャルモニタを提示し，バーチャルモニタとの性能比較を行った事例がある．この研究では，AR モニタは現行技術水準においては解像度や表示安定性にやや課題があるものの，作業自体の達成は十分に可能であり，特に物理とバーチャルのハイブリッド構成では最も高いユーザ満足度が得られたと報告されている．

これらの研究は，HMD を用いた遠隔監視 UI の設計において，レイアウトの柔軟性，ユーザへの個別最適化，状況把握の観点から重要な示唆を与えるものである．本研究で開発する HORUS Monitor システムは，これらの設計原則と自動運転遠隔監視というドメイン特性を統合することで，新たな人間中心監視環境の構築に取り組む．

3. HORUS Monitor

3.1 概要

HORUS Monitor は，レベル 4 自動運転車両の遠隔監視を目的とした，バーチャルモニタ型遠隔監視システムである．本システムは，車両から送信される複数のカメラ映像をネットワーク経由で受信し，HMD のパススルー機能を用いて，実空間上の任意の位置にバーチャルウィンドウとして表示する．ユーザは，複数のバーチャルウィンドウを自身の周囲空間に自由に配置し，位置，大きさ，角度を調整することで，個人に適した監視レイアウトを構築できる．本システムの目的は，物理モニタに依存しない監視環境を実現し，監視場所の制約を低減するとともに，監視員ごとの身体的特徴や作業姿勢，嗜好に応じた柔軟な監視環境を提供することである．

© 2018 Information Processing Society of Japan

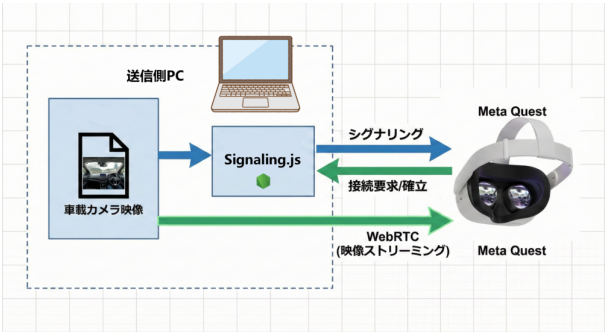


図 2: HORUS Monitor のシステム概要図.



図 3: Receiver の表示画面.

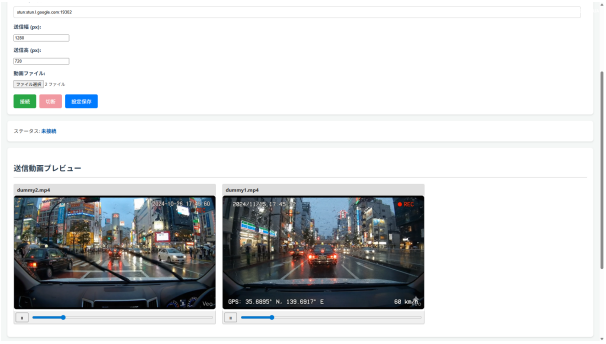


図 4: Sender の画面.

3.2 設計

HORUS Monitor は，映像ストリーミングを受信する Receiver，映像ストリーミング送信する Sender，両者を接続するためのシグナリングサーバで構成される (図 2). Receiver は HMD で稼働し，バーチャルウィンドウ内に映像を表示する．Sender は本来は車載映像をリアルタイムで送信するものだが，本論文では既存の映像の動画ファイルを読み込んで，WebRTC を用いて送信する．

3.3 Receiver

Receiver では，映像をストリームごとに HMD 内のバーチャルウィンドウに表示する (図 3)．ユーザは，バーチャルモニタを三次元空間内の任意の位置に配置できる．仮想モニタの位置は HMD 座標系に基づいて管理され，ユーザの移動や姿勢変化に対しても安定して表示される．各仮想モニタは個別に大きさおよび角度を調整可能であり，重要度の高い映像を大きく表示するなどのカスタマイズが可能である．これにより，ユーザの監視しやすい配置や距離，大きさにした状態で監視できるようになっている．

Reseiver を稼働する HMD には，パススルー映像が表示可能な Meta Quest 3[12] を用いる．バーチャルウィンドウの操作には，Meta Quest 3 のコントローラまたはハンドジェスチャを用いる．ユーザは，バーチャルウィンドウを掴んで移動させることができる．また，拡大縮小ジェスチャを用いてウィンドウサイズを変更できる．

Receiver は，Meta Quest 3 でスタンドアロン動作する．Meta XR SDK を用いて Unity で実装した．WebRTC for Unity で映像を受信し，バーチャルウィンドウは RawImage インスタンスを新たに作成して割り当てて表示する．これらの RawImage は，任意の位置に配置し，拡大および縮小することができる．

3.4 Sender

Sender は，WebRTC を用いて動画ファイルをリアルタイムにストリーミング送信するための Web ベースのアプリケーションである（図 4）．ユーザは送信動画の解像度をピクセル単位で指定し，任意の動画ファイルを選択して送信対象として設定することができる．送信動画のプレビューを表示する機能が備わっており，各映像の再生状況を確認できる．通信には WebRTC を用いており，STUN サーバを設定することで NAT 越えに対応している．ユーザーは接続，切断，設定保存ボタンを使ってストリーミングセッションの制御を行う．ステータス表示により接続状態も明示される．このような構成により，本ソフトウェアは遠隔監視や遠隔操作用途における映像送信モジュールとして活用できる．

Sender は，1 つの PeerConnection で複数の MediaStreamTrack を送信できるよう実装した．この実装は，複数の車の車載カメラ映像を同時に受信することや，1 台の車に複数の車載カメラが搭載されている場合を想定したものである．本論文では，2 本の映像ファイルを MediaStreamTrack としてストリーミングを行う．

4. 評価実験

4.1 概要

HORUS Monitor の実用性とユーザビリティを検証するため，評価実験を実施した．被験者は 9 名で，いずれも北海道在住の大学生または大学院生である．評価実験では，HORUS Monitor を用いて HMD 上に 2 つのバーチャルウィンドウを表示する．ウィンドウには車載カメラの録画映像をストリーミング再生し，自動運転の遠隔監視と同様の状況をつくった．被験者に映像を注視してもらうため，映像内のコンビニエンスストアを数えるという監視タスク

© 2018 Information Processing Society of Japan

表 1: アンケートの項目

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） / 運転免許なし
Q2	ヘッドマウントディスプレイの使用頻度	ほぼ毎日使用している / 週に一度以上使用している / 月に一度以上使用している / 使用したことがある / 使用したことがない
Q3	このシステムは必要以上に複雑だと感じた	1. まったく当てはまらない 〜 5. とても当てはまる
Q4	このシステムは使いやすいと思う	1. まったく当てはまらない 〜 5. とても当てはまる
Q5	このシステムを使うには専門家のサポートが必要だと思う	1. まったく当てはまらない 〜 5. とても当てはまる
Q6	このシステムはそれぞれの機能がよく統合されていると思う	1. まったく当てはまらない 〜 5. とても当てはまる
Q7	このシステムには一貫性が欠けていると思う	1. まったく当てはまらない 〜 5. とても当てはまる
Q8	多くの人がこのシステムの使い方をすぐに覚えられると思う	1. まったく当てはまらない 〜 5. とても当てはまる
Q9	このシステムを使うのはとても面倒だと思った	1. まったく当てはまらない 〜 5. とても当てはまる
Q10	このシステムを使うとき，自信を持って操作できた	1. まったく当てはまらない 〜 5. とても当てはまる
Q11	このシステムを使い始める前に，多くのことを学ぶ必要があった	1. まったく当てはまらない 〜 5. とても当てはまる
Q12	本システムの使用感についてのコメント	自由記述
Q13	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

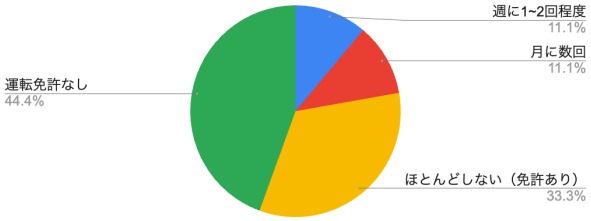


図 5: Q1「自動車の運転頻度を教えてください」の回答.

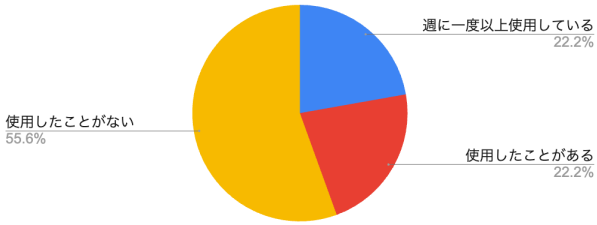


図 6: Q2「ヘッドマウントディスプレイの使用頻度」の回答.

を課した．比較する対照条件として，平面ディスプレイでの映像監視も実施した．ノート PC の液晶ディスプレイで 2 つのウィンドウを表示し，車載カメラの録画映像を動画プレイヤーで再生した．被験者は，HORUS Monitor と平面ディスプレイの両方での遠隔監視の実験を行う．順序による影響が出ないよう，被験者の半数は HORUS Monitor での実験を先に，もう半数は平面ディスプレイでの実験を先に実施するようにした．

4.2 結果

Q3〜Q11 の回答に基づいて，SUS スコアを算出した．前述の通り設問を 9 項目としたため，スコアの最大が 100 となるよう係数をかけて補正した．SUS スコアは，対照条件の平面ディスプレイが 80.25，HORUS Monitor が 77.47 であった．奇数番号の設問の回答結果を図 8 に示す．奇数番号の設問では，数値が低いほどポジティブな評価となる．偶数番号の設問の回答結果を図 8 に示す．偶数番号の設問では，数値が高いほどポジティブな評価となる．Q4「このシステムは使いやすいと思う」や，Q5「このシステムはそれぞれの機能がよく統合されていると思う」では，HORUS Monitor が高い評価を得た．

Q12 および Q13 の回答を以下にまとめる．HORUS Mon-

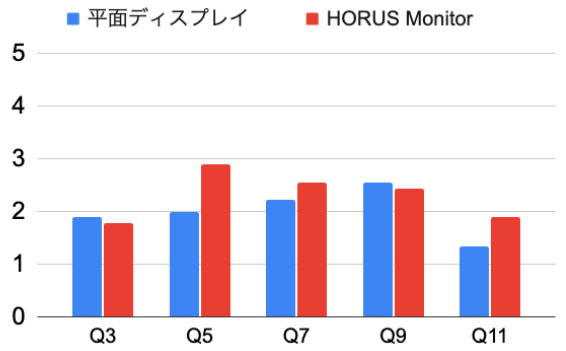


図 7: 奇数番号設問（Q3〜Q11）の回答の平均値．数値が低いほどポジティブな評価となる．

itor へのポジティブなコメントとして

- 2 つ並べた映像に比べてこのシステムは，自由な大きさかつ位置で見ることができるため，見やすいと思った．
- 映像の移動はし易いと思う
- ディスプレイを手軽に好きな配置に設定できるのはとても魅力的に感じた．
- 私は VR をよく使っているのですぐに慣れることができた．平面ディスプレイよりは使いにくさは感じた

© 2018 Information Processing Society of Japan

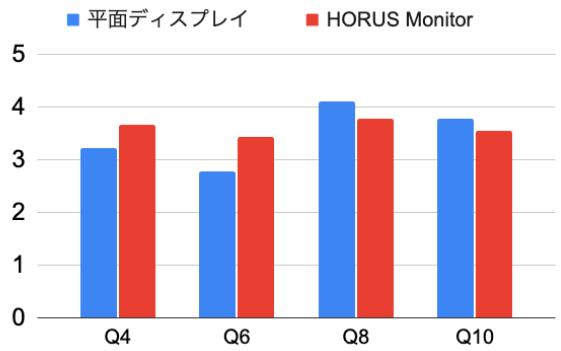


図 8: 偶数番号設問（Q4〜Q10）の回答の平均値．数値が高いほどポジティブな評価となる．

が，映像の大きさや位置を操作可能なので長期間使うならばこちらの方が使いやすいのではと感じる．

- 位置を変えるのは実際のディスプレイでも可能だが，大きさまで変えられるのは VR ならではなので是非実用可能になるまで研究を進めて欲しいです

といった回答があった．

HORUS Monitor へのネガティブなコメントとして

- ヘッドマウントディスプレイの使用に慣れていないため長時間の利用は辛いと思った
- ヘッドマウントディスプレイに比べて平面ディスプレイで見た方が見やすかったです．

といった回答があった．

また，平面ディスプレイへのネガティブなコメントとして

- ふたつでも映像が複数あると視点が定まらないことがあった
- 2 つの画面のため何とかなっているが，増えると厳しい気がする

といった回答があった．これらは，HORUS Monitor の設計に活用できる可能性がある．

5. おわりに

本研究では，レベル 4 自動運転車両の遠隔監視における柔軟性とユーザ適応性の向上を目的として，HMD を用いたバーチャルディスプレイ型監視システム HORUS Monitor を提案し，その実装と評価を行った．HORUS Monitor は，HMD 上でのバーチャルディスプレイを操作することで，場所にとらわれず，監視者の身体的特性や好みに合わせた柔軟なモニタ配置を可能とする．

評価実験では，被験者実験によって HORUS Monitor と平面ディスプレイのユーザビリティの比較を行い，その利点と欠点を洗い出した．サイズの調整や，モニタの自由配置といった機能は，遠隔監視に適した環境の実現につながることが示唆される．一方，今回の評価実験で評価しきれなかった事項もあると考える．身体的負荷や疲労度などは，長時間使用してみないとわからない点である．今後の実証においては，こうした長時間利用時の影響を含めた継続的な評価が必要である．

今後の課題として，仮想モニタの枚数や配置方法が監視者の認知負荷や状況把握に与える影響を踏まえた UI 設計の最適化が挙げられる．必要な映像やデータを，どの位置にどのように提示すべきかといった配置設計は，HMD 特有の空間的インタフェースと深く関係しており，ユーザごとの特性やタスク内容に応じたレイアウトの指針が求められる．また，車両から送信される多量の情報をすべて提示するのではなく，状況に応じて必要な情報を選別や抽象化して表示することも重要である．視覚的過負荷を避け，監視判断に必要十分な情報を的確に伝える UI 設計が，HORUS Monitor の実用性向上つながる．

また，我々の過去の研究では，遠隔監視システムの UI 検討のために CARMUI というバーチャル都市環境を開発してきた [13][14]．CARMUI のバーチャル都市内の車載カメラの映像は WebRTC で送られるため，HORUS Monitor と接続可能である．訓練やシステムテストのため，CARMUI を活用することも考えられる．

本研究が，HMD を活用した柔軟かつ人間中心の遠隔監視 UI の可能性を示し，今後の自動運転社会における監視システムの設計指針として貢献することを期待する．

参考文献

[1] Waymo: https://waymo.com/.
[2] Wolf, M.-M., Schmidt, H., Christl, M., Fank, J. and Diermeyer, F.: A user-centered teleoperation GUI for automated vehicles: Identifying and evaluating information requirements for remote driving and assistance, *Multimodal Technologies and Interaction*, Vol. 9, No. 8, p. 78 (2025).
[3] Graf, G. and Hussmann, H.: User requirements for remote teleoperation-based interfaces, *12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, pp. 85–88 (2020).
[4] Tener, F. and Lanir, J.: Driving from a distance: challenges and guidelines for autonomous vehicle teleoperation interfaces, *Proceedings of the 2022 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 1–13 (2022).
[5] Lindgren, I. and Larsson Vahlberg, A.: Remote Operation in a Modern Context (2023).
[6] 永平寺町：レベル 4 自動運転「ZEN drive」，https://www.town.eiheiji.lg.jp/200/206/208/p010484.html.
[7] KDDI: 国内初、自動運転トラックの遠隔監視・異常検知・車両退避実証に成功，https://newsroom.kddi.com/news/detail/kddi_nr-688_4061.html.
[8] Bout, M., Brenden, A. P., Klingegård, M., Habibovic, A. and Böckle, M.-P.: A head-mounted display to support teleoperations of shared automated vehicles, *Proceedings of the 9th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications adjunct*, pp. 62–66 (2017).
[9] Bouzón, I., Pascual, J., Costales, C., Crespo, A., Cima,

© 2018 Information Processing Society of Japan

C. and Melendi, D.: Design, implementation and evaluation of an immersive teleoperation interface for human-centered autonomous driving, *Sensors*, Vol. 25, No. 15, p. 4679 (2025).
[10] Daeijavad, P. and Maurer, F.: A Review of Virtual Display Layouts in HMD-based Extended Reality., *RealXR@ AVI* (2024).
[11] Pavanatto, L., North, C., Bowman, D. A., Badea, C. and Stoakley, R.: Do we still need physical monitors? an evaluation of the usability of ar virtual monitors for productivity work, *2021 IEEE virtual reality and 3D user interfaces (VR)*, IEEE, pp. 759–767 (2021).
[12] Meta: Meta Quest 3 , https://www.meta.com/jp/quest/quest-3/.
[13] 井上慎之介，清水怜良，金子直矢， 阿部博， 湯村翼：CARMUI: 自動運転車遠隔監視システムの UI 検討のためのバーチャル都市プラットフォームの開発，インタラクション 2024 論文集 (2024).
[14] 秋葉貴文，清水怜良，井上慎之介，金子直矢，牧野仁宣，湯村翼：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，技術報告 (2025).

© 2018 Information Processing Society of Japan