

3D Gaussian Splattingを用いたダイナミックプロジェクションマッピングに関する検証

郡山 颯斗^{*1} 渡辺 義浩^{*1}

Abstract – 近年、動的な物体を対象として映像を投影する、ダイナミックプロジェクションマッピング (DPM) について研究が進んでいる。DPM では、映像を投影した際の遅延を覚悟することで没入感が低下することを防ぐため、高速な処理が必要である。さらに、没入感向上のために、投影映像の写実的な表現も重要となる。これに対して、高速かつ写実的にレンダリングが可能な手法として、近年 3D Gaussian Splatting (3DGS) が注目されている。そこで本稿では、3DGS を DPM のレンダリングに用いることで、高速性を維持しながら写実的な映像を投影する可能性に注目する。しかし、3DGS は、従来 DPM に用いられていた手法とはレンダリング方法が異なる問題がある。この点を踏まえ、投影対象に合わせた映像を出力可能なレンダリング視点位置を計算で求めることで、DPM に 3DGS を用いる手法を提案する。

Keywords : 拡張現実, 3D Gaussian Splatting

1 はじめに

近年、映像を物体に重ねて投影するプロジェクションマッピング (PM) を用いた表現が、エンターテインメントや教育、デザインの分野などを中心に活用されている [1, 2, 3]。このような PM において、写実的な表現は没入感を向上させるうえで重要である。

また、静的な物体だけでなく、動的な物体を対象としたダイナミックプロジェクションマッピング (DPM) についても研究が進んでいる [4, 5, 6]。DPM において、運動物体に追従して投影を行う場合、投影対象の位置の検出 (トラッキング) から投影までの間には遅延が生じる。このような遅延が知覚されることで、没入感が低下することを防ぐため、DPM では高速な処理が求められる。遅延の知覚特性を調査した研究では、平均 3.87 ms 以内に遅延を抑える必要があることが報告されている [7, 8]。しかし、レンダリングにおいて写実性と高速性はトレードオフの関係にある。そのため、高速性を保ちながら写実的な表現を実現するための研究が進められている [9]。

一方、高速・高品質にレンダリングが可能な手法として、近年 3D Gaussian Splatting (3DGS) が注目されている [10]。3DGS は、画像からシーンを構築し、視点位置を入力としてシーンの描画を行う手法である。そこで、3DGS を DPM のレンダリングに用いることで、高速性を維持しながら写実的な映像を投影できると期待される。

また、3DGS はイメージベースの手法であり、DPM でも、実際に目の前に存在する現実のシーン (実シーン) の質感再現が可能であると考えられる。このよう

な実シーンの再現を、従来 DPM に用いられてきたシミュレーションベースの手法を用いて行う場合、物体表面の物理的特性の計測が必要となる。しかし、3DGS は、従来 DPM に用いられてきた手法とは、レンダリング方法が異なる問題がある。

そこで本稿では、投影対象に合わせた映像を出力可能なレンダリング視点位置を計算で求めることで、DPM に 3DGS を用いる手法を提案する。実験では、投影対象の動きに合わせた視点変換が出来ているかを検証し、その精度を確認した。

2 関連研究

2.1 パストレーシング型 DPM

現在 DPM に用いられている投影映像のレンダリング手法として、パストレーシングがある [6]。パストレーシングは、視点から画像上の各ピクセルへ向けて光線を射出し、光線の挙動をシミュレートすることで画素値を計算する手法である。シミュレートする光線の本数 (samples-per-pixel: spp) を増やすことで写実的な映像をレンダリングすることができるが、処理には長い時間を要する。また、同手法を用いて、実シーンを再現するためには、物体表面の物理的特性の計測が必要になる。現在までに、同手法を用いた実シーンの再現は試されていない。

2.2 Neural Projection Mapping

Yotam らは、ニューラルネットワークを用いた表現を活用し、任意の視点からの高品質な PM を実現する Neural Projection Mapping を提案した [2]。同手法では、NeRF を PM のレンダリングに利用することで、任意の視点からの高品質な PM を可能にした。しかし、

^{*1}東京科学大学

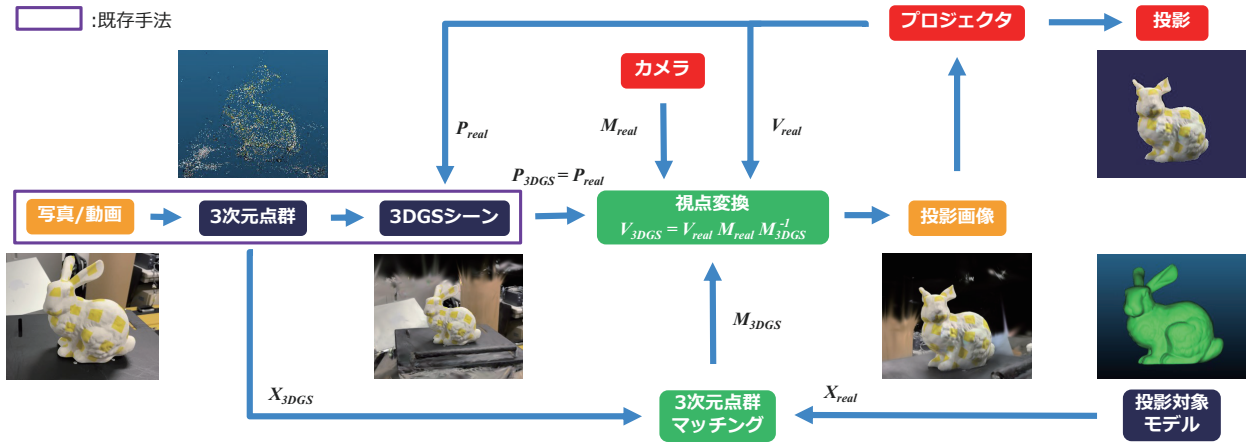


図 1: 手法の全体像
Fig.1 Overview of the method.

同手法は PM の写実性向上とシーン編集を目的としたものであり、実シーンの再現は行われていない。

2.3 3D Gaussian Splatting

イメージベースで高速にレンダリングが可能な手法として、近年 3D Gaussian Splatting (3DGS) が注目されている [10]。3DGS は、写真から 3 次元点群の位置を取得し、それを基にガウシアンと呼ばれる密度分布を用いて 3 次元シーンを構築することで、任意の視点からのレンダリングを可能とする。これにより、実シーンの再現を行うことができる。同手法は NeRF などの従来手法と比べ、高速・高品質にレンダリングすることが可能である。

しかし、3DGS では、従来 DPM に用いられてきたシミュレーションベースの手法とはレンダリング方法が異なる。従来 DPM に用いられていた手法では、投影対象の動きに合わせて、既知の投影対象の 3 次元形状モデルを動かすことで映像を生成する。一方、3DGS では視点を動かすことでレンダリングを行う。そのため、3DGS をそのまま DPM のレンダリングに用いることはできない。

また一般に、3DGS では再現されたシーンと光源の相対位置が固定され、視点のみが動く。したがって、3DGS のシーン内の光の当たり方は常に一定であり、投影対象の動きに合わせて光の当たり方が変化する DPM とは異なる。

3 3DGS を用いた DPM

3.1 手法概要

本稿では、DPM のレンダリング処理に 3DGS を利用する手法を提案する。本手法の全体像を図 1 に示す。条件として、投影対象は剛体で、1 つのみとする。DPM の処理の流れは従来のパストレーシング型 DPM と同

じとし、投影対象のトラッキング、レンダリング、投影からなるものとする。まず事前に投影したい実物体を多方向から撮影し、3DGS を用いて 3 次元シーンを構築する。その後リアルタイムに、トラッキングにより得られた投影対象の位置姿勢に合わせて、3DGS のレンダリングを行う視点位置を計算する。続いて、計算された視点位置からレンダリングを行い、生成された映像をプロジェクタから投影する。

3.2 視点位置計算

DPM において、投影対象のモデル座標系上の点 X_{real} に対応する投影画像上の点 x_{real} は、プロジェクタの投影変換 P_{real} とビュー変換 V_{real} 、投影対象のモデル変換 M_{real} を用いて次式で与えられる。

$$x_{real} = P_{real}V_{real}M_{real}X_{real} \quad (1)$$

一方、3DGS のシーン座標系上での各点 X_{3DGS} に対応する、レンダリング画像上の点 x_{3DGS} は、レンダリングの投影変換 P_{3DGS} とビュー変換 V_{3DGS} を用いて次式で表すことができる。

$$x_{3DGS} = P_{3DGS}V_{3DGS}X_{3DGS} \quad (2)$$

シーンの各点 X_{3DGS} と、投影対象の各点 X_{real} が対応するとき、以下の式が成り立つ。

$$x_{real} = x_{3DGS} \quad (3)$$

この時、式 (1)~(3) より以下の式が与えられる。

$$P_{real}V_{real}M_{real}X_{real} = P_{3DGS}V_{3DGS}X_{3DGS} \quad (4)$$

ここで、3DGS で構築したシーンに、以下を満たす M_{3DGS} を用いることで、仮想的なモデル変換を設定する。

$$X_{3DGS} = M_{3DGS}X_{real} \quad (5)$$

また、あらかじめレンダリング視点の投影変換を、プロジェクタの投影変換と一致させる。

$$P_{3DGS} = P_{real} \quad (6)$$

式 (4)~(6) より、以下の式が成り立つ。

$$V_{3DGS} = V_{real} M_{real} M_{3DGS}^{-1} \quad (7)$$

したがって、式 (7) を用いて V_{3DGS} を計算し、得られた視点位置から映像をレンダリングする。

計算に必要な各変換行列の取得方法を以下に示す。 V_{real}, P_{real} はあらかじめ取得しておき、 M_{real} はリアルタイムに、投影対象の動きをトラッキングをすることで得る。また、3次元点群マッチングと呼ばれる、異なる点群間の対応点を見つける手法を用いて、 M_{3DGS}^{-1} を得る。具体的には、3DGS への入力画像群から得られた3次元点群 X_{3DGS} と、投影対象の3次元点群 X_{real} の対応点を基に位置合わせを行い、 M_{3DGS}^{-1} を求める。

4 実験

4.1 実験条件

実験には、Intel Core i9-13900K, Nvidia RTX 4090 を用いた。投影や評価に用いた画像の解像度はすべて $1024 \text{ px} \times 768 \text{ px}$ である。

4.2 視点変換

図2に示すように、ウサギ型の人形である bunny を用いたシミュレーションにおいて、視点変換により得られた映像と、プロジェクタ視点からの投影対象の輪郭部分のずれを評価した。ここでは、投影対象の位置姿勢をシミュレーションベースで与えているため、投影対象の輪郭は真値として得られる。エッジ検出には Canny 法を用いた。投影対象の輪郭から、視点変換で得られた映像のエッジまでの平均距離は 3 px であった。

4.3 DPM シミュレーション

提案手法を利用して、投影対象のトラッキングから投影までのシミュレーションを、bunny を用いて行った。図3に示すように、投影対象の動きとして入力された bunny の位置姿勢に合わせ、映像がリアルタイムに投影されていることを確認した。また、視点位置の計算から CPU への画像読み出しまでに要する時間が、 2 ms であることを確認した。

4.4 被写体を回転させる撮影

本節では、3DGS を用いたシーン構築のための撮影時に、光源とカメラを固定し、被写体のみを回転させて撮影を行うことで、視点依存で光の当たり方を変化させることが可能か検証する。図4に示すように、撮影の際には、背景に黒布を用い、3次元点の検出が行いやすくなるよう、チェッカーボードも被写体と共に回転させた。図5に示すように、鏡面反射特性をもつ物

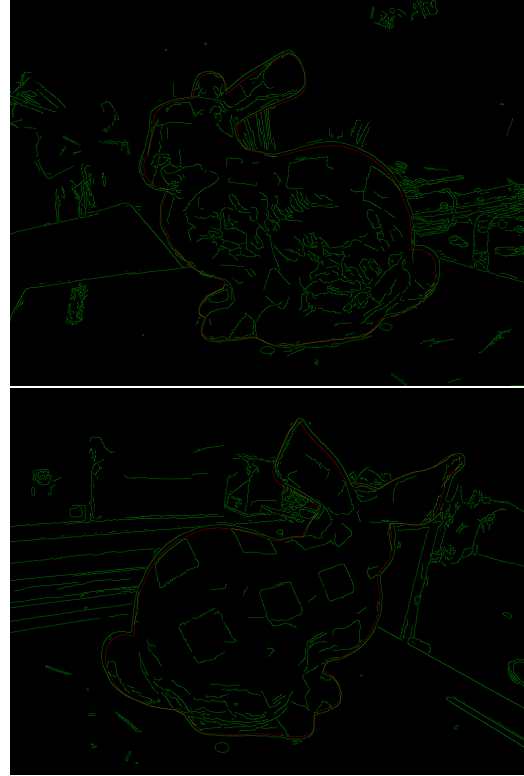


図2: 輪郭検出による精度評価: 赤線は投影対象の輪郭を、緑線は3DGSで視点変換を行って得られた画像から検出されたエッジを示す。

Fig. 2 Accuracy evaluation: The red line represents the contour of the projection target, and the green line represents the edges detected from the rendered image.

体を用いてシーンを構築し、視点によって反射光が変化していることを確認した。

5 考察

実験結果より、シミュレーション上において、運動する投影対象に追従して映像が投影されることを確認し、視点位置の計算から CPU への画像読み出しまでが、 2 ms で行われた。このレンダリング速度は、人間の遅延知覚の弁別閾と比較しても高速であるため、実際に DPM を行う際にも、十分に実用的であると考えられる。

また、今回レンダリングに用いた3DGSの論文では、レンダリング速度が 134 fps とされている [10]。一方、本実験条件において、通常の3DGSのレンダリングは 800 fps で行われた。この高速化には、3DGSの論文で用いられていた GPU である、Nvidia RTX A6000 との性能の違いのほか、再現するシーンの複雑さが影響していると考えられる。具体的には、奥行方向のガウシアン数が多いほどレンダリングに時間を要すると考えられる。3DGSの論文で用いられていたシーンに

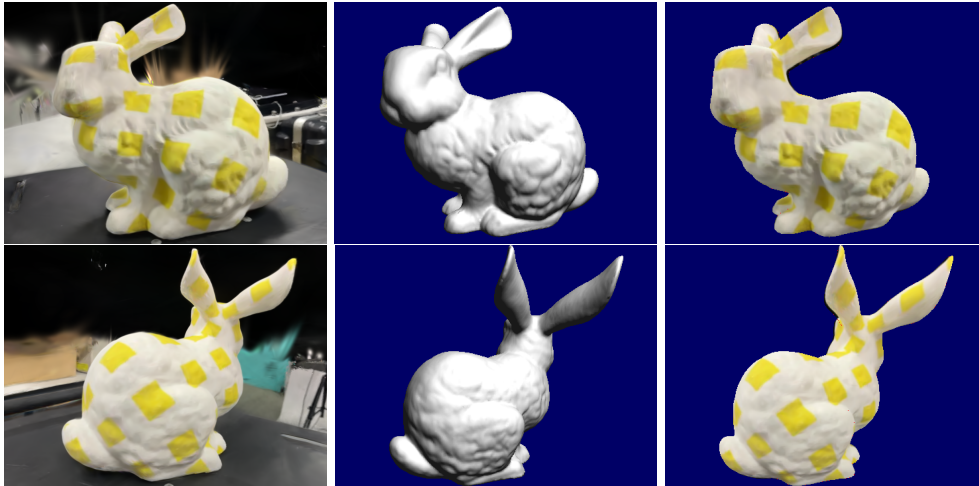


図 3: DPM シミュレーションによる実験結果: 左から, 投影画像, 投影前, 投影後.

Fig.3 Experimental results of DPM simulation: From left to right, projected image, before projection, after projection.

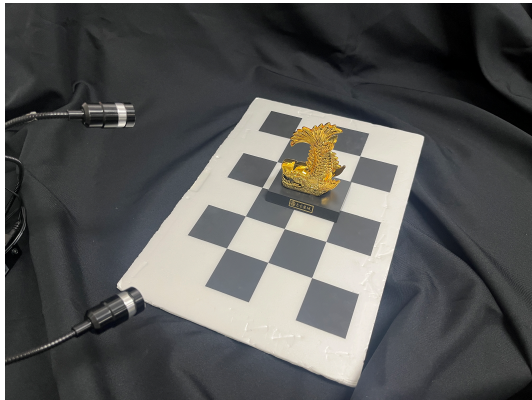


図 4: モデルを回転させる撮影時の撮影環境

Fig.4 Shooting environment during the rotation of the model.

においては, ビューボリューム中のガウシアン数が約 80 万 個であったが, 今回の bunny のシーンでは約 10 万 個であった. 本手法においては, 背景などモデル以外のシーン表現は必要ないため, ガウシアン数も相対的に少なくなり, 比較的高速にレンダリング可能であると考えられる.

また, 視点変換のずれの大きな要因は 3 次元点群の精度によるものと考えられる. 上記の誤差は, 入力画像から得られた 3 次元点群の精度, または生成された 3DGS シーンの精度の, いずれか, もしくは両方が低いことに起因する. ここで, 図 6 に 3DGS シーンの精度を評価したものを示す. 現実の画像と, 3DGS で再現したシーンからレンダリングされた画像を用い, Canny 法を用いてエッジを検出した. それぞれで検出されたエッジ間の距離は 1 px 未満であった. そのため, 3DGS シーンの精度は比較的高いと考えられ, 3 次元点群の精度が低いことが誤差の大きな要因であると

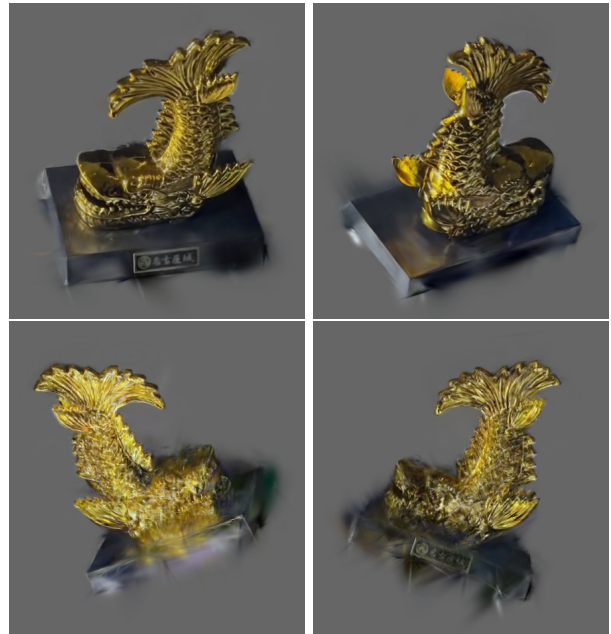


図 5: モデルを回転させて撮影し, シーン再構成した結果: カメラから見て, しゃちほこの左側に光源を固定して撮影したもの.

Fig.5 Result of scene reconstruction by rotating the model: The light source is fixed to the left side of the shachihoko.

考えられる. したがって, 3 次元点群マッチングに用いる 3 次元点群の精度が向上することで, 視点変換の精度も大きく向上させることができると考えられる.

さらに, 図 5 の結果より, 撮影方法を工夫することで, 3DGS を DPM に導入しても, 光の当たり方などを大まかには表現することが可能になると期待される. 一方で, 3DGS 自体は正確に鏡面反射などを再現することができておらず, 高周波成分の表現や, 入力画像から大きく離れた視点におけるレンダリング品質を保

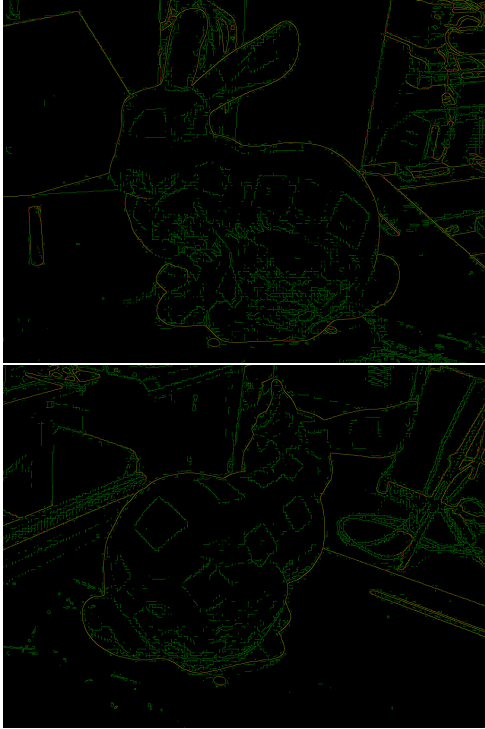


図6: 輪郭検出による3DGSの精度評価: 緑線は実シーンの画像, 赤線は同じ視点位置で3DGSでレンダリングされた画像から, それぞれ検出されたエッジを示す。

Fig. 6 Accuracy evaluation of 3DGS: The green line represents the edges of the real scene image, while the red line represents the edges of the image rendered from the same viewpoint.

つことは難しい。このような問題に対処するため、視点依存表現の高品質化を目指した3DGSの派生手法があるが、同手法はレンダリングに時間を要する [11]。そのため、本手法において投影映像の品質の向上を行うには、同手法の高速・高品質化が必要である。

一方、光源情報を分離してシーン構築を行う、3DGSの派生手法も研究されている [12]。同手法では、視点とは別に光源の位置を自由に決定してレンダリングが可能だが、処理に時間を要する課題が残っている。そのため、同手法の高速化を進めることで、通常の撮影方法を用いても、DPMにおいて光の当たり方を変化させることができると期待される。

6 まとめ

本稿では、3DGSのレンダリング視点位置を計算で求め、投影対象に合わせた映像を出力することで、DPMに3DGSを用いる手法を提案した。また、投影対象の動きに合わせた視点変換が出来ているかを検証し、その精度を確認した。本手法を用いることで、従来は投影映像として用いられていなかった実シーンを、DPMで再現することが可能になる。今後の課題として、DPM

の実装や視点変換の精度向上、投影映像の品質向上が挙げられる。

参考文献

- [1] Daisuke IWAI. Projection mapping technologies: A review of current trends and future directions. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, Vol. 100, No. 3, pp. 234–251, 2024.
- [2] Yotam Erel, Daisuke Iwai, and Amit H. Bermano. Neural Projection Mapping Using Reflectance Fields. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, Vol. 29, No. 11, pp. 4339–4349, 2023.
- [3] 小谷章夫, 小谷真央. デザイン教育におけるプロジェクションマッピング活用の一検討. *日本教育工学会論文誌*, Vol. 40, No. Suppl., pp. 125–128, 2017.
- [4] Leo Miyashita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Midas projection: Markerless and modelless dynamic projection mapping for material representation. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 37, No. 6, pp. 1–12, 2018.
- [5] 水谷晃三. ダイナミックプロジェクションマッピングによるデバイスレスな教育学習環境の提案. 第44回教育システム情報学会, 2019. C2-3.
- [6] Takashi Nomoto, Ryo Koishihara, and Yoshihiro Watanabe. Realistic dynamic projection mapping using real-time ray tracing. In *ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies*, 2020.
- [7] Hao-Lun Peng, Shin'ya Nishida, Yoshihiro Watanabe. Studying user perceptible misalignment in simulated dynamic facial projection mapping. In *Proceedings of the 2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 493–502, 2023.
- [8] 河口将也, 彭浩倫, 西田真也, 渡辺義浩. 顔への追従投影における遅延知覚と表情変化の関係の分析. 第29回バーチャルリアリティ学会大会, 2024. 2E2-09.
- [9] 羽山大智, 宮本駿一, 渡辺義浩. 観測視点・対象運動・投影解像度に応じて計算負荷を削減するパストレーシング型ダイナミックプロジェクションマッピング. 第28回バーチャルリアリティ学会大会, 2023. 2D1-5.
- [10] Bernhard Kerbl, Georgios Kopanas, Thomas Leimkühler, and George Drettakis. 3d gaussian splatting for real-time radiance field rendering. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 42, No. 4, 2023.
- [11] Xiuchao Wu, Jiamin Xu, Chi Wang, Yifan Peng, Qixing Huang, James Tompkin, and Weiwei Xu. Local gaussian density mixtures for unstructured lumigraph rendering. In *ACM SIGGRAPH Asia 2024 Conference Papers*, 2024.
- [12] Zoubin Bi, Yixin Zeng, Chong Zeng, Fan Pei, Xiang Feng, Kun Zhou, and Hongzhi Wu. Gs^3 : Efficient relighting with triple gaussian splatting. In *SIGGRAPH Asia 2024 Conference Papers*, 2024.

© 2025 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)