



3D Gaussian Splatting を用いた動的投影による 実物体の視覚的複製の検証

郡山 颯斗¹⁾, 渡辺 義浩¹⁾

1) 東京科学大学 工学院 情報通信系 (〒 226-0026 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, koriyama.h.fddc@m.isct.ac.jp)

概要: ダイナミックプロジェクションマッピングによる実物体の視覚的複製を, 光学特性の詳細な計測を必要とせずに行うために, イメージベースレンダリングを行う 3D Gaussian Splatting (3DGS) を利用することを考える. 本稿では, 視覚的複製に向けた, じっさいの投影による検証結果を報告する. また, 実際に投影を行い, 視覚的複製が行われているかを確認した.

キーワード: プロジェクションマッピング, 3D Gaussian Splatting

1. はじめに

近年, プロジェクションマッピング (PM) がエンターテインメントや教育, デザインなどの分野を中心に活用されている [1, 2]. さらに, 動的物体に追従して投影を行う, 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 [3, 4]. DPM は, 物体の運動に追従して映像が投影されるため, 従来の PM と比較して高い没入感を得ることが可能である.

一方, 投影対象の撮像から投影までの間に生じる遅延による没入感の低下を防ぐため, DPM では各処理を高速に行う必要がある. また, レンダリング処理では, 没入感向上のために写実的な映像の生成が必要となるが, 写実性と高速性を両立することは難しい.

現在, DPM のレンダリングに用いられている手法に, パストレーシングがある [5]. 視点から画像上の各ピクセルに向けた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り, 光線の本数を増やすことで写実的な映像をレンダリングできる. 一方, 物理ベースレンダリング手法であるため, 美術品や文化財などの実世界に存在する唯一無二の物体を再現するには, 光学的特性などの計測が必要となる. しかし, 計測には時間を要する上, 高精度に行うことが難しい問題がある.

一方, 画像から 3 次元シーンを再構成し, 任意の視点からのレンダリングを可能とする手法として, 近年 3D Gaussian Splatting (3DGS) が注目されている [6]. 3DGS はイメージベースレンダリング手法であり, 撮像して得られた画像を入力として, 色や陰影などの質感を保ちながら再構成を行う. したがって, 光学的特性などの計測を必要とせずに実世界に存在する物体 (実物体) を含むシーンを再構成することが可能である.

そこで, DPM のレンダリングに 3DGS を利用して, 実物体の視覚的複製を行うことができる可能性に着目する. しかし, 3DGS はイメージベースレンダリング手法であり, 従来の DPM に用いられてきた, 物理ベースレンダリング手法と異

なる. 従来手法では, レンダリングの際に, 既知の投影対象の 3 次元モデルを動かしていたが, 3DGS ではシーンが固定されているため, 視点を動かす必要がある.

これまでに我々は, 投影対象の位置姿勢に応じて, 3DGS の視点位置を計算する手法を提案した. 本手法では, あらかじめ 3DGS を用いてシーンを再構成し, 投影画像が投影対象の位置姿勢に合う視点位置を計算する. その後, 得られた視点位置からレンダリングを行うことで, 3DGS を DPM に導入する. 本稿では新たに, 実際に投影を行い, 視覚的複製が行われているかを確認した.

2. 関連研究

2.1 パストレーシング型 DPM

現在 DPM に用いられているレンダリング手法として, パストレーシングが挙げられる. パストレーシングは, 視点から画像上の各ピクセルに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. 同手法では, 射出した光線が物体に当たった場合, 光線の反射方向を確率的に計算する. そのため, 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.

このような中 Nomoto らは, 人間の知覚積分効果を用いることで, パストレーシングを DPM に導入した [5]. 知覚積分効果とは, 人間が視覚上で短時間に提示された画像を積分して認識する効果である. 同効果により, 低 spp でレンダリングされたノイズのある画像を高速に投影した場合, ノイズが低減されているように知覚される.

一方, パストレーシングは物理ベースレンダリング手法であり, 実物体の複製を行うには光学的特性などの計測が必要となる. しかし, 計測には時間を要する上, 高精度に行うことが難しい問題がある.

2.2 3D Gaussian Splatting

近年, 画像から 3 次元シーンを再構成し, 任意の視点からの画像をレンダリング可能な手法として, 3DGS が注目され

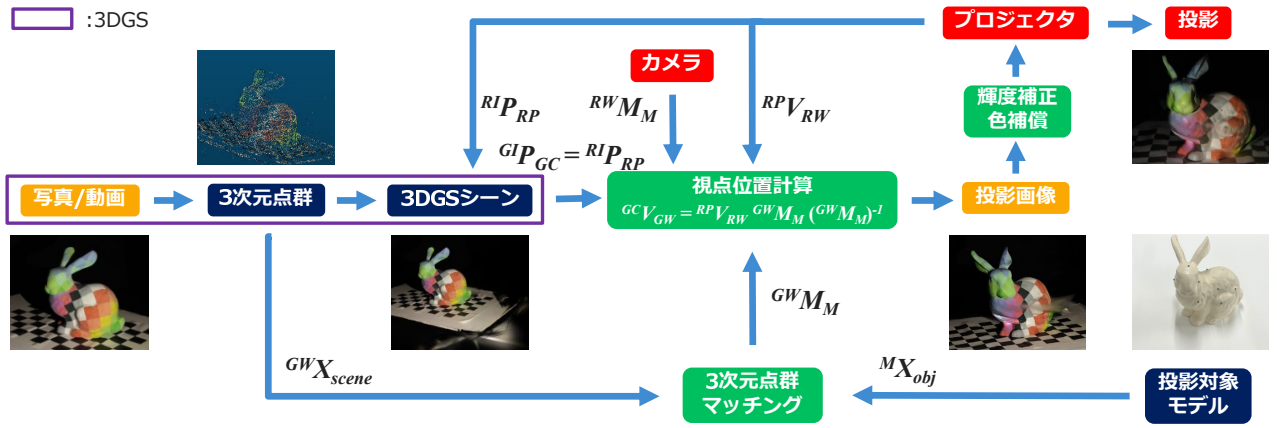


図 1: 手法全体像. 3DGS と同じ処理をする部分を紫の枠で囲った.

ている [6]. 3DGS は, 撮像された多視点の画像を基に, ガウシアンと呼ばれる密度分布を用いることで 3 次元シーンを再構成する. また, イメージベースレンダリング手法であるため, 実物体の光学的特性などの計測を必要とせず, 再現することが可能である.

しかし, 従来 DPM に用いられてきた物理ベースレンダリング手法とは, レンダリング方法が異なる問題がある. DPM において, プロジェクタは固定であり, 投影対象の動きに合わせて投影する映像を変える必要がある. 物理ベースレンダリング手法では, 投影対象の動きに合わせて既知の投影対象の 3 次元形状モデルを仮想空間で動かし, 映像のレンダリングを行う. 一方 3DGS では, 再構成されたシーンは動かすことができず, シーン内の視点を動かすことでレンダリングを行う. そのため, 3DGS を DPM のレンダリングにそのまま用いることはできない.

2.3 3 次元シーン再構成を用いた PM

3 次元シーン再構成手法を利用した PM に関する研究もおこなわれている. Erel らは, Neural Radiance Fields (NeRF) [7] と呼ばれる手法を活用し, 任意の視点からの高品質な PM を提案した [1]. 同手法は, 再構成された 3 次元シーンにプロジェクタを光源として組み込み, プロジェクタのパラメータも同時に最適化することで, 新規の視点に対しても適切な映像の投影を可能にした.

さらに Deng らは, プロジェクタを光源として組み込む 3 次元シーンの再構成に, NeRF ではなく 3DGS を用いることで, メモリや計算の効率面を大幅に改善させた [8]. また同手法では, シーンに再現像の反射特性などを追加することで, より正確なシーン表現を可能にした. しかし, 上記の手法は PM を目的としたものであり, 実物体の視覚的複製や DPM は行われていない.

一方我々は, 3DGS を DPM に用いるための視点位置計算手法を提案した [9]. 同手法はプロジェクタ視点から得られる映像での投影対象の位置と, 3DGS でレンダリングされた映像で再現した実物体の位置が全く同じになるような視

点位置を計算し, DPM の映像生成に利用するものであるレンダリングに利用した. しかし, シミュレーションでしか検証されておらず, 実物体への投影は行われていない他, カメラプロジェクタ間の色補償等についても未検討であった.

3. 視点位置計算手法

3.1 手法概要

本稿では, DPM のレンダリング処理に 3DGS を利用し, 実物体の視覚的複製の検証を行う. 図 1 に, 手法の全体像を示す. 視点位置計算に関しては従来手法を用いる [9]. また, 投影結果と複製対象を視覚的に一致させるため, レンダリングされた映像に対して輝度補正と色補償を行う [10].

3.2 視点位置計算

本節では, 従来手法の視点位置計算手法 [9] を紹介する. ここでは, 座標を示すベクトルを太字, 座標系変換を細字で示す. また, ベクトルの左上は座標系を, 右下はどの対象の座標であるかを示し, 座標系変換は右下の座標系から左上の座標系への変換を意味する.

投影対象の位置姿勢に合わせた視点位置を求めるために, 3DGS 内のカメラの位置姿勢を求める計算を以下に示す. ここで, カメラの位置姿勢は, 3DGS のワールド座標系 GW からカメラ座標系 GC へのビュー変換 $G^C V_{GW}$ で表すことができる. DPM において, 投影対象のモデル座標系 M における点 $M \mathbf{X}_{obj}$ に対応する投影画像座標系 RI での点 $RI \mathbf{u}_{obj}$ は, プロジェクタ座標系 RP から画像座標系 RI への投影変換 $R^I P_{RP}$ と, ワールド座標系 RW からプロジェクタ座標系 RP へのビュー変換 $R^P V_{RW}$, モデル座標系 M からワールド座標系 RW へのモデリング変換 $R^W M_M$ を用いて次式で与えられる.

$$RI \mathbf{u}_{obj} = R^I P_{RP} R^P V_{RW} R^W M_M M \mathbf{X}_{obj}. \quad (1)$$

一方, 3DGS のワールド座標系 GW での各点 $G^W \mathbf{X}_{scene}$ に対応する, レンダリング画像座標系 GI での点 $GI \mathbf{u}_{scene}$ は, 3DGS 内のカメラ座標系 GC から画像座標系 GI への



図 2: 左がシーン再構成用の撮像時の実験環境。右が投影時の実験環境。撮像は、暗環境下でプロジェクタから白色投影を行い、ウサギとチェッカーボードを回転させながら行った。投影時は 投影対象の四方にある OptiTrack でトラッキングを行った上で投影を行い、その結果をカメラで撮像した。

投影変換 ${}^{GI}P_{GC}$ と、3DGS のワールド座標系 GW からカメラ座標系 GC へのビュー変換 ${}^{GC}V_{GW}$ を用いて次式で表すことができる。

$${}^{GI}\mathbf{u}_{scene} = {}^{GI}P_{GC} {}^{GC}V_{GW} {}^{GW}\mathbf{x}_{scene}. \quad (2)$$

シーンの各点 ${}^{GW}\mathbf{x}_{scene}$ と、投影対象の各点 ${}^M\mathbf{x}_{obj}$ が対応するとき、以下の式が成り立つ。

$${}^{GI}\mathbf{u}_{scene} = {}^{RI}\mathbf{u}_{obj}. \quad (3)$$

式 (1) – (3) より、以下の式が成り立つ。

$${}^{GI}P_{GC} {}^{GC}V_{GW} {}^{GW}\mathbf{x}_{scene} = {}^{RI}P_{RP} {}^{RP}V_{RW} {}^{RW}M_M {}^M\mathbf{x}_{obj}. \quad (4)$$

ここで、モデル座標系 M から 3DGS のワールド座標系 GW へのモデリング変換 ${}^{GW}M_M$ を、以下の式を満たすように決定する。

$${}^{GW}\mathbf{x}_{scene} = {}^{GW}M_M {}^M\mathbf{x}_{obj}. \quad (5)$$

また、あらかじめ 3DGS の投影変換 ${}^{GI}P_{GC}$ を、プロジェクタの投影変換 ${}^{RI}P_{RP}$ と一致させる。

$${}^{GI}P_{GC} = {}^{RI}P_{RP}. \quad (6)$$

式 (4) – (6) より、以下の式が成り立つ。

$${}^{GC}V_{GW} = {}^{RP}V_{RW} {}^{RW}M_M ({}^{GW}M_M)^{-1}. \quad (7)$$

上記の式 (7) を用いて、 ${}^{GC}V_{GW}$ 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の取得方法を以下に示す。ワールド座標系 RW からプロジェクタ座標系 RP へのビュー変換 ${}^{RP}V_{RW}$ と、プロジェクタの投影変換 ${}^{RI}P_{RP}$ はあらかじめ取得しておき、モデル座標系 M からワールド座標系 RW へのモデリング変換 ${}^{RW}M_M$ は、リアルタイムに投影対象の動きをトラッキングすることで得る。また、3DGS のシーンの点群 ${}^{GW}\mathbf{x}_{scene}$ と、投影対象の 3 次元点群 ${}^M\mathbf{x}_{obj}$ に対して、点群間の対応点とその際の変換を取得する、3 次元点群マッチングと呼ばれる手法を用いる。上記の位置合わせのための変換が、モデル座標系 M から 3DGS のワールド座標系 GW へのモデリング変換の逆行列 $({}^{GW}M_M)^{-1}$ として得られる。

4. 実験

4.1 実験条件

実験には、Intel Core i9-13900K, Nvidia GeForce RTX 4090 を用い、図 2 に示すような配置で撮像、投影を行った。投影に用いた画像の解像度は 1024×768 px である。トラッキングには 500 fps で駆動する OptiTrack を使用し、投影には 947 fps, 解像度 1024×768 px のカラー投影が可能な高速プロジェクタを用いた [11]。また撮像用カメラとして、SONY $\alpha 7R$ IV (ILCE-7RM4) を用いた。投影対象として用いたウサギの大きさは、 $230 \times 230 \times 180$ mm であり、複製対象として用いたウサギの大きさは、 $200 \times 200 \times 150$ mm であった。なお、投影対象に利用したウサギには、OptiTrack による位置検出のため、再帰性反射材が貼付されている。

プロジェクタから白色投影を行い、カメラを固定した状態で、複製対象となる実物体のみを回転させて撮像を行い、得られた画像から 3DGS に基づいてシーンを再構成した。その後、投影対象の位置姿勢に応じて再構成されたシーンでの視点位置計算を行い、暗環境下でレンダリングされた映像を投影して、実物体の視覚的複製を行った。

視点位置計算時に必要となるワールド座標系 RW として、OptiTrack の座標系を利用し、シーン再構成のための 3 次元点群取得には、Structure from Motion (SfM) と呼ばれるアルゴリズムを利用した。また、3DGS のワールド座標系 GW へのモデリング変換の逆行列 $({}^{GW}M_M)^{-1}$ を得るために行った、3DGS のシーンの点群 ${}^{GW}\mathbf{x}_{scene}$ と、投影対象の 3 次元点群 ${}^M\mathbf{x}_{obj}$ の 3 次元点群マッチングには、Iterative Closest Point (ICP) と呼ばれるアルゴリズムを用いた。

4.2 投影結果

図 3 に、実際に投影した結果を示す。左上の画像は投影前の状態を示す。各図において、図の左側が投影対象、右側が複製対象である。ここでは結果の比較のため、複製対象には全面白色投影を行った。結果より、投影対象と投影映像のずれが見られず、視点位置が正しく計算されていることが確認できた。一方、今回の投影対象として完全拡散反射体ではな

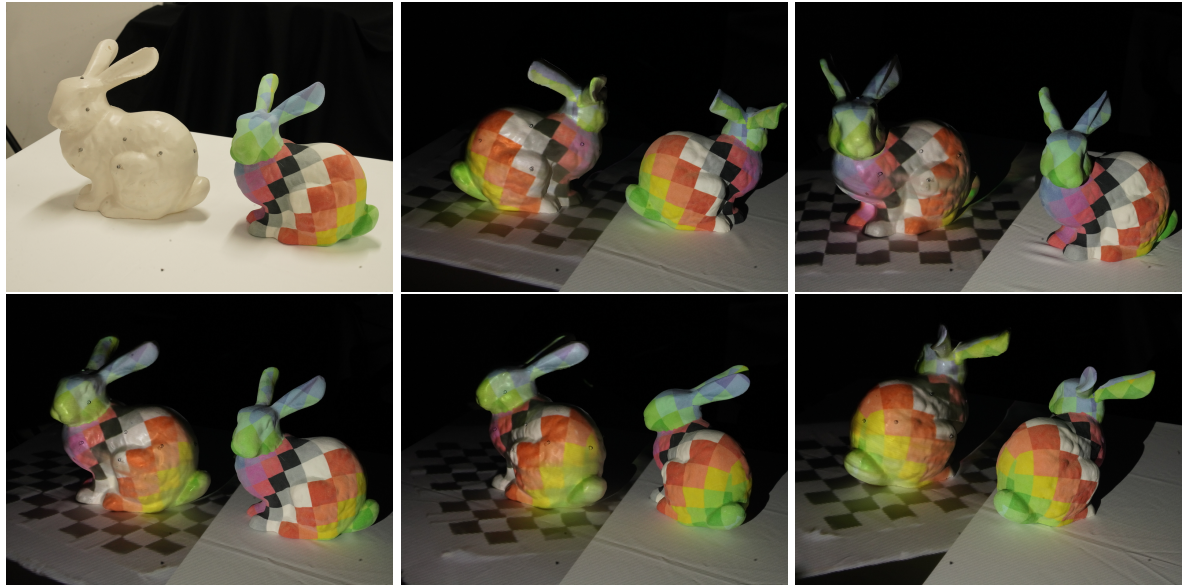


図 3: 投影前 (左上) と投影結果. 左側に投影対象を, 右側に複製対象を配置した. 比較のため, 複製対象にのみ白色投影を行っている. 投影映像にチェッカーボードが現れている理由は, シーン再構成用の撮像時に含まれていたためである.

い素材を用いたため, 複製対象には存在しないハイライトが現れた.

5. まとめ

本稿では, 3DGS を DPM のレンダリングに用いることで, 実物体の視覚的複製を行うことができるか検証した. 実験結果から, 投影対象の位置姿勢から 3DGS のレンダリング視点の視点位置計算より, 適切な映像が投影されていることが確認できた. 今後の課題として, より複雑な反射特性を持つ, 視点依存で外観が変化する物体の複製などが挙げられる.

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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 Suppl., pp. 125–128, 2017.
- [3] Sora Hisaichi, Kiwamu Sumino, Kunihiro Ueda, Hidenori Kasebe, Tohru Yamashita, Takeshi Yuasa, Uwe Lippmann, Petra Aswendt, Roland Höfling, and Yoshihiro Watanabe. Depth-Aware Dynamic Projection Mapping using High-speed RGB and IR Projectors. In *ACM SIGGRAPH Asia*, 2021.
- [4] Leo Miyashita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Midas projection: Markerless and model-less dynamic projection mapping for material representation. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 37, No. 6, 2018.
- [5] Takashi Nomoto, Ryo Koishihara, and Yoshihiro Watanabe. Realistic Dynamic Projection Mapping Using Real-Time Ray Tracing. In *ACM SIGGRAPH*, 2020.
- [6] 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.
- [7] Ben Mildenhall, Pratul P. Srinivasan, Matthew Tanik, Jonathan T. Barron, Ravi Ramamoorthi, and Ren Ng. NeRF: representing scenes as neural radiance fields for view synthesis. *Communications of the ACM*, Vol. 65, No. 1, pp. 99–106, 2021.
- [8] Qingyue Deng, Jijiang Li, Haibin Ling, and Bingyao Huang. GS-ProCams: Gaussian Splatting-based Projector-Camera Systems. *arXiv preprint arXiv:2412.11762*, 2024.
- [9] 郡山颯斗, 渡辺義浩. 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討. 第 75 回複合現実感研究会, No. MR2025-04, 2025.
- [10] Xinli Chen, Xubo Yang, Shuangjiu Xiao, and Meng Li. Color mixing property of a projector-camera system. In *Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Workshop on Projector Camera Systems*, 2008.
- [11] Yoshihiro Watanabe and Masatoshi Ishikawa. High-speed and high-brightness color single-chip DLP projector using high-power LED-based light sources. In *26th International Display Workshops*, pp. 1350–1352, 2019.