



学内文化財における 3D Gaussian Splatting を活用した Location-Based Virtual Reality の試作

Prototyping Location-Based Virtual Reality for
On-Campus Cultural Heritage Using 3D Gaussian Splatting

太田 啓路¹⁾, 梅原 灯志¹⁾, ウメザワ ジャスティン 博司²⁾, 福江 菜緒子³⁾, 具嶋 恵³⁾, 福野 明子³⁾
Keiji OHTA, Tomoshi UMEHARA, Justin Hiroshi UMEZAWA, Naoko FUKUE, Megumi GUSHIMA, and
Akiko FUKUNO

1) 国際基督教大学 (〒 181-8585 東京都三鷹市大沢 3-10-2, ohtak@icu.ac.jp)

2) 株式会社リ・インベンション (〒 169-0072 東京都新宿区大久保 2-7-1 大久保フジビル 704, info@re-invention.jp)

3) 国際基督教大学博物館 湯浅八郎記念館 (〒 181-8585 東京都三鷹市大沢 3-10-2, museum-office@icu.ac.jp)

概要: 3D Gaussian Splatting (3DGS) は, リアルタイム描画と高精細表現を両立する空間再構築手法であり, 文化遺産の体験型アーカイブへの応用が進んでいる. 本研究では, 国際基督教大学構内の登録有形文化財「泰山荘・一畳敷」を 3DGS で再構築し, 複数人が同時に体験できる Location-Based VR (LBVR) コンテンツを試作した. 高低差ある地形を活かし一畳敷をモチーフに体験を設計し, 建物の主・松浦武四郎を語り部とする物語性を与えた. 本稿では, 撮影から体験までの構成と試作で得られた知見・課題を報告する.

キーワード: 3D Gaussian Splatting, Location-Based VR, 文化財デジタルアーカイブ,
没入型コンテンツ

1. はじめに

大学キャンパス内に保存される歴史的建築や庭園などの文化財には, 建築的・文化的価値を持ちながら, 公開機会や物理的アクセスの制約から, 教育・研究・地域への活用が十分に進んでいないものが少なくない. こうした文化財を写真や図面といった平面的な記録にとどめず, その空間に身を置いて体験できる形の保存・公開へとどう発展させるかが, 本研究の問題意識である.

本研究では, 3D Gaussian Splatting (3DGS) [1] を用いて, 国際基督教大学 (ICU) キャンパス内の登録有形文化財「泰山荘 (たいざんそう)」の核となる建造物である「一畳敷 (いちじょうじき)」[2] を高精細に空間再構築し, Location-Based VR (LBVR) として複数人で同時に没入体験できるシステムを試作した. LBVR とは専用会場など特定の場所で提供される VR 体験の総称で, 広い空間を実際に歩き回りながら複数人で体験できる点を特徴とする (エンタテインメント用途は LBE: Location-Based Entertainment と呼ばれる). 一畳敷は, 幕末の探検家・松浦武四郎が建てた一畳の書斎であり (図 1), 素材そのものが歴史を物語る点に特徴がある. 本研究の貢献は, (1) 撮影から体験に至る 3DGS 文化財再構築パイプライン, (2) 床・壁 2 マーカーによる実空間整合や複数人キャリブレーション同期など共有 LBVR 機構の独自実装, (3) 一畳敷と武四郎の物語性を

軸とするコンテンツ設計, の 3 点である. 本稿執筆時点では試作段階にあり定量評価は計測中であるが, 屋外・小空間・低照度という条件下での 3DGS 適用を通じて得られた知見・課題を報告する.



図 1: ICU キャンパスの森に建つ一畳敷 (茶室「高風居」に内包される).

2. 関連研究

2.1 文化遺産のデジタルアーカイブと体験化

文化遺産の三次元記録は, フォトグラメトリや LiDAR によるメッシュ化から, シーンを放射輝度場として学習する NeRF [5], さらに多数の 3 次元ガウス分布 (スプラット) の集合で表現する 3DGS [1] へと展開してきた. 筆者らは泰山荘を対象に, フォトグラメトリによる 3D メッシュを用

いた VR コンテンツを既に制作しており、雨天時の泰山荘見学の代替や海外での学会発表の場で公開してきた。一方、メッシュベースの表現では、建造物へ至る森の多数の木々や下草といった自然物の質感の再現に限界があった。3DGS は、こうした植生の柔らかな見えに加え、漆や金箔のような反射物の視点に応じた輝きも再現できる点で、体験型の文化財アーカイブに適すると考えられる。ただし高精細なシーンは描画負荷が高く、VR コンテンツへ適用するには負荷低減の工夫が必要である（4 章）。

2.2 LBVR の動向

会場で複数人が広い空間を自由に歩いて体験する LBVR の事例は、世界的に増えている。エジプトの大ピラミッドを複数人で歩きながら体験する『Horizon of Khufu』[6] や、放送用 CG を VR 体験へ再利用した NHK『幻の豊臣大坂城』[7] は代表例である。一方、現存する文化財を実写ベースで三次元再構築し、その所在地で複数人が歩いて体験できる国内事例はまだ少なく、本研究はその一つの試みと位置づけられる。

2.3 大学博物館による文化遺産の保全

大学博物館は、資料の収蔵・研究に加えて教育や地域・国際社会への公開を担う存在であり、その活動は近年活発化している[4]。ICU の湯浅八郎記念館も、民芸資料や考古資料の収蔵・展示とともに、泰山荘の保存・公開を担ってきた。本研究はその一環として、学内文化財のデジタル保存・公開に取り組む。

3. 対象とした文化財「泰山荘・一畳敷」

一畳敷は、「北海道」の名付け親として知られる幕末の探検家・松浦武四郎（1818-1888）が古希を祝うため 1886 年に建てた一畳の書齋で、全国の由緒ある古社寺の古材約 90 点で構成され、最古の木片は白鳳期（645-710）に遡るといわれる[2][3]。武四郎の没後、神田・麻布・代々木上原を経て 1930 年代に三鷹へ移築され、戦後に ICU がその敷地を取得した。現在は茶室を備えた小庵「高風居」に内包され、書院・表門・蔵・車庫・待合とともに泰山荘を構成する 6 棟が 1999 年に国の登録有形文化財となっている。

撮影・再構築の観点では、金箔の残る神棚、天井の古材に描かれた雲竜の墨絵、駿河・久能寺の欄干の擬宝珠を逆さに据えた床柱、京都・大徳寺に由来する古板、朱漆の扉など、主要な古材の質感と来歴が空間の価値を成す（図 3）。これらの古材の多くは、武四郎が全国行脚で親交を結んだ友人・知人に乞うて譲り受けたものであり、その経緯は武四郎自身が『木片勸進』として記録している[2]。この「素材の物語性」を高精細に保存できる点が 3DGS を用いる動機である。一方で、主室が一畳程度という極小空間、障子越しの自然光に頼る低照度、森の中に建つがゆえの屋外環境という条件は、撮影・再構築上の難所でもある。

4. システム構成

本システムは、(1) 撮影、(2) SfM (Structure from Motion) によるカメラ位置推定と 3DGS の学習、(3) 解説アバター制作、(4) Unity 上でのオーサリング、(5) 共有 LBVR 体験、から構成される（図 2）。(3)(4) のコンテンツ面は 5 章で述べる。

4.1 撮影

撮影には全天球カメラ DJI Osmo 360 [9] と小型ジンバルカメラ DJI Osmo Pocket 3 [10] を併用し、全天球映像で空間全体を収録した。また建物内部が狭小であるため、小回りの利く小型カメラである Pocket 3 を用いて古材や細部を重点的に撮影した。音響については、アンビソニックマイク ZOOM H3-VR を用いて、鳥のさえずりや風など現地の環境音を立体音響として収録した。小空間・低照度・屋外という条件に合わせて経路と露出を設計し、対象の実寸・スケールは図録[2]所収の実測建築図面を基準とした。なお、撮影は湯浅八郎記念館の許可・協力のもと、文化財の保全に配慮して実施した。

4.2 3DGS による再構築

撮影データから 3DGS シーンを学習・最適化した。本試作では表門・一畳敷（高風居）・敷地全体の 3 対象に分割して再構築し、それぞれ約 50 万・約 100 万・約 100 万、総計約 250 万スプラット（3D Gaussian）で動作させている（図 3 は一畳敷を約 100 万スプラットで出力した例である）。また、描画負荷に応じて使い分けるため、対象ごとに詳細度の異なる複数バージョンを作成している。品質向上のためにはさらに規模を高めることが望ましく、これらの値は Meta Quest 3 実機での描画負荷と古材の質感表現の両立を意図した暫定値であり、妥当性は検証中である。

4.3 共有型 LBVR 体験システム

学習した 3DGS シーンは、複数人が同一の物理空間を共有して歩ける LBE 型の VR システム上に配置して提示する。プレイヤーは Meta Quest 3 を装着するクライアント、進行情報管理は Windows PC のホストが担い、両者は同一 LAN で接続する（Unity Netcode for GameObjects, リレー不使用）。各 HMD は実空間に設置した 2 つの ArUco マーカー（ID1：壁＝前方、ID2：床＝原点）を個別に検出し、全仮想コンテンツを保持する基準座標（以下、WorldRoot と呼ぶ）を実空間へ整合させる。これにより、全員が同じ場所を共有した状態で同一の 3DGS 空間内を自由に歩行できる。アバターは VRM と Final IK (VRIK) で表現し、頭・手に加えて指の動きも同期する。体験は Timeline で駆動し、ロビーから対象シーンへ全員同時に遷移する。安全確保にはガーディアン境界を用いる。実装は Unity 6 上で行い、描画パイプラインには Universal Render Pipeline (URP) を採用した。

4.4 既存技術の利用と本研究の実装範囲

本システムは既存の基盤技術を活用しつつ、共有体験に必要な機構を独自に実装した。3DGS の描画は aras-p の UnityGaussianSplating [8] (MIT ライセンス) のフォー

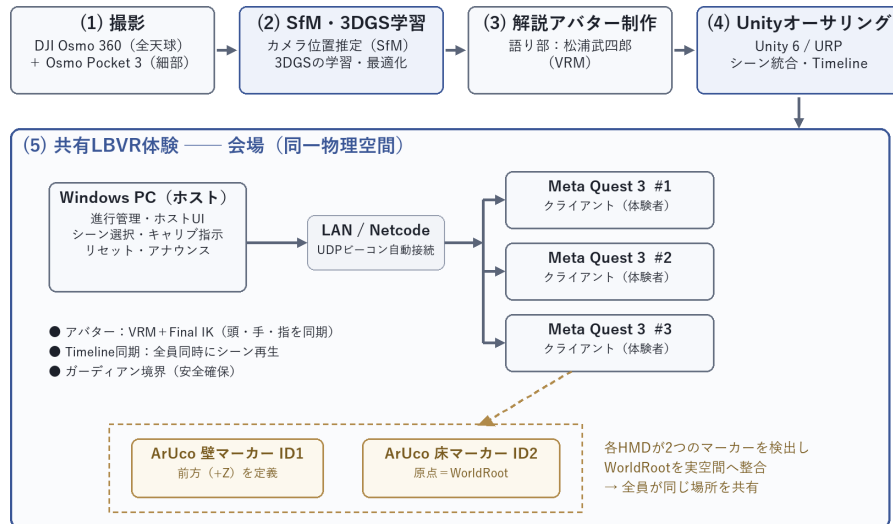


図 2: システム構成の概要.



図 3: 一畳敷の 3DGS による再構築 (約 100 万スプラットで出力した例) .

クを URP 上で用い、HMD 向けの描画最適化を独自に実装した。カリングや描画順ソートの高速化、シーンの分割描画、距離に応じた詳細度制御などを組み合わせ、描画負荷を軽減している (Meta Quest 3 実機での描画性能は検証中)。マーカー検出・姿勢推定は QuestArUcoMarkerTracking [11] (MIT ライセンス) を基にし、本研究では以下のマルチユーザー機構を独自に実装した。

- (1) **床・壁 2 マーカーによる WorldRoot 整合**: 床マーカーを原点、壁マーカーで前方を定義し、各 HMD が個別に検出して仮想空間を実空間へ一致させる。
- (2) **複数人キャリブレーション同期**: ホストが全クライアントの検出完了を確認したうえで一斉に座標を確定し、参加者間の位置ずれを防ぐ。
- (3) **アバターのオフセット同期**: ワールド座標ではなく頭・手の相対オフセットと身長・スケールを一つの構造体で送信し、帯域を節約しつつ各 HMD の WorldRoot 基準で相手のポーズを再構築する。
- (4) **UDP ピーコンによる自動接続**: ホストが接続情報を周期配信し、IP アドレスの手入力なしに参加できる。
- (5) **Timeline 同期・安全境界**: 全員の準備完了後にシーンを同時再生し、境界接近時の警告と逸脱時のパススルー切

替で安全を確保する。ネットワーク・IK・アバターにはそれぞれ前項に述べた既存基盤を用いる。

5. コンテンツ設計

空間の再現にとどめず、先行する LBVR 作品 [6][7] を参考に、複数人で同時に楽しめるエンタテインメント性を備えた体験を設計した。

空飛ぶ畳による移動デザイン: 泰山荘は崖線 (はけ) の高低差ある地形に建つ。LBVR において、HMD を装着したまま階段や坂などの高低差を実際に歩いて移動することは転倒などの危険を伴うため、エレベータのような乗り物型の移動演出が用いられることが多い。本研究では「一畳」という主題に呼応し、来訪者が空飛ぶ畳に乗って高低差を安全に移動する演出を採用した。

MR 的な導入: 体験の冒頭では、パススルーを用いて現実の会場から仮想の泰山荘へと連続的に移行する MR 的な演出を行い、現実と仮想の接続そのものを体験の一部とする。

松浦武四郎を語り部とする物語性: 体験に筋を与えるため、一畳敷の主である松浦武四郎 (3 章) [2] を語り部とし、古材一点ごとの来歴や全国行脚の逸話をたどりながら空間を巡るストーリーを与えた。これらの設計により、エンタテインメント性と文化財に関する学術的な学びの両立を図る。

6. 試作の現状

表門・一畳敷 (高風居)・敷地全体の 3 対象について 3DGS 再構築を進めている (図 3)。現状では 3DGS シーンの描画までが完成しており、今後、語り部アバターやインタラクションを順次追加していく。描画性能については、約 300 万スプラット規模での安定動作を目標に、前述の描画負荷対策と併せて性能向上を進めている。体験環境としては、一畳敷と同寸の畳を製作し、その畳上で体験を構成する (図 4)。体験者は Meta Quest 3 を装着し、床面の ArUco マーカー (原点) と前方向の ArUco マーカーにより位置合わせ



図 4: 複数人での LBVR 体験の様子（湯浅八郎記念館）。一畳敷と同等に製作した畳の上で体験し、床面（原点）と前方向の 2 枚の ArUco マーカーで位置合わせした同一の 3DGS 空間を共有する。

された同一の 3DGS 空間を共有する。畳の寸法の制約から、同時体験は最大 3 名を想定している。2026 年 9 月の本大会にて、本システムのデモ公開を予定している。

7. 考察

2.1 節で述べた筆者らのフォトグラメトリによる泰山荘の VR コンテンツと比較すると、3DGS では森を含む広域な屋外環境の収録・制作工程が大幅に簡略化された。一方、古材の墨書や彫刻といった詳細部の再現には、全天球カメラに加えて複数カメラによる高密度な撮影などの工夫が依然として必要である。また、遠景・広域には 3DGS、近接観察やインタラクションの対象には 3D メッシュを充てるハイブリッド構成も有効と考えられる。3DGS の写実的な表現と、現地で空間を歩く LBVR の場所性は相補的に機能し、古材の質感や光の入り方といった一畳敷固有の価値の体験的理解に寄与しうる。試遊を通じて、実寸の空間を自らの足で歩けること自体の満足感が高いことも確認された。さらに実物の畳の上で体験する構成により、視覚・聴覚に加えて畳の触感やい草の匂いが没入を強める相乗効果が期待でき、立体音響（4.1 節）と併せた多感覚的な文化財体験を狙う。『Horizon of Khufu』に代表される大空間踏破型の LBVR に対し、本事例は「小空間・高密度・素材物語性」という対照的な体験軸を示す。一方、撮影・再構築の過程では、屋外・低照度・極小空間に起因する露出変動、植栽など動的要素、スケール・位置合わせ、データ量といった 3DGS 適用上の課題が確認された。

今後の課題は、語り部アバターとインタラクションの実装、約 300 万スプラット規模での描画性能の計測、複数人同時体験時の位置合わせ精度の評価である。ユーザー評価は毎年 10 月の泰山荘一般公開に合わせて行う予定である。

8. むすび

本研究では、ICU の登録有形文化財「泰山荘・一畳敷」を対象に、撮影から閲覧に至る 3DGS 再構築パイプライン、共有 LBVR 機構の独自実装、および一畳敷と武四郎の物語性を軸とするコンテンツ設計から成る体験型デジタルアーカイブを試作した。本手法は泰山荘の他の建物群や学内外

の文化財にも展開可能であり、追加コストを抑えた継続的なアーカイブ化が期待できる。語り部アバターによる解説は多言語化が容易であり、海外来訪者への公開や国際交流の場での活用も視野に入れている。今後は再構築品質と体験設計の定量評価を進め、文化財の保存・教育・公開への応用を図る。一畳敷は、わずかに一畳の広さから全国の旅を回想した武四郎の書斎である。築後 140 年を経たこの一畳を、現代の空間表現技術によって時間と場所の制約から解放し、誰もが訪れ、物語に出会える体験として届けていきたい。

謝辞 本研究の対象文化財の調査・撮影にあたり、国際基督教大学博物館湯浅八郎記念館の皆様にご協力を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- [1] B. Kerbl, G. Kopanas, T. Leimkühler, G. Drettakis: 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering, ACM Transactions on Graphics, Vol. 42, No. 4, 2023.
- [2] 国際基督教大学博物館湯浅八郎記念館：一畳敷 — 松浦武四郎の書斎（The One-Mat Room: Matsuura Takeshirō's Private Study），国際基督教大学博物館湯浅八郎記念館，2018.
- [3] H. D. Smith：泰山荘 松浦武四郎の「一畳敷」の世界，国際基督教大学博物館湯浅八郎記念館，1993.
- [4] 福江菜緒子：ドイツ・ドレスデン工科大学開催 ICOM-UMAC & UNIVERSEUM 2024 参加記，博物館研究，Vol. 60, No. 6, pp. 16–19, 日本博物館協会，2025.
- [5] B. Mildenhall, P. P. Srinivasan, M. Tancik, J. T. Barron, R. Ramamoorthi, R. Ng: NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis, Proc. ECCV, 2020.
- [6] Excurio: Horizon of Khufu (Location-Based VR), <https://www.excurio.com/> (2026 年 7 月 1 日参照)。
- [7] NHK：VR『サムライの見た夢 — 幻の豊臣大坂城』，<https://nhk-vr-samurais-dream.jp/> (2026 年 7 月 1 日参照)。
- [8] A. Prancėvičius (aras-p): UnityGaussianSplatting, <https://github.com/aras-p/UnityGaussianSplatting> (2026 年 7 月 2 日参照)。
- [9] DJI：Osmo 360, <https://www.dji.com/jp/osmo-360> (2026 年 7 月 3 日参照)。
- [10] DJI：Osmo Pocket 3, <https://www.dji.com/jp/osmo-pocket-3> (2026 年 7 月 3 日参照)。
- [11] T. Yoshinaga: QuestArUcoMarkerTracking, <https://github.com/TakashiYoshinaga/QuestArUcoMarkerTracking> (2026 年 7 月 2 日参照)。