3次元計測ビッグデータを活用した有形文化財の可視化――高精細可視化・半透明可視化

3次元計測ビッグデータを活用した有形文化財の可視化 ——高精細可視化・半透明可視化・VR

長谷川 恭子(立命館大学総合科学技術研究機構 准教授) 李 亮(立命館大学情報理工学部 准教授) 田中 覚(立命館大学情報理工学部 教授)

1. はじめに

本稿では、筆者らが主催する立命館大学情報理工 学部コンピュータグラフィックス第 1 研究室で現在進め ている研究のうち、3 次元計測によってデジタル保存さ れた有形文化財を可視化する研究を紹介する。

近年の3次元計測技術の発展には著しいものがある。具体的には、レーザー計測やフォトグラメトリ(写真計測)の技術、そして計測機器を搭載して遠隔計測を行えるUAV(小型無人航空機、通称ドローン)の技術等が急速に発展した。これらの技術発展により、現実世界の物体を、その形に関しても色に関しても、容易かつ精密にデジタル保存出来るようになった。そこで我々の研究では、有形文化財のデジタル保存データを活用して、有形文化財を様々なスタイルで可視化する手法、技術、ソフトウェアを開発している。

3 次元計測で取得されるデータは、3 次元的な点の 集合(以下、3 次元計測点群)であり、多くの場合、大 規模データとなる。巨大文化遺跡の計測などでは、し ばしば、数千万点から数十億点規模の点群が得られ る。これはビッグデータと言って良い規模である。たと えば、近年行われた3次元計測では、ケントカウエス女 王墓(エジプト)で3億点、マチュピチュ(ペルー)で3億 点、ハギアソフィア大聖堂(トルコ)で9億点の点群が得 られた。3 次元計測点群の特徴は、データ量の巨大さ だけでなく、データが記述する内容の複雑さにもある。 たとえば、最近の3次元計測技術を用いれば、建造物 の外側と内側を別々に計測し、あとから両者の計測デ ータを合成して建物全体の完全な 3 次元構造を記述 する点群を構成できる。こうして構成された点群は、建 物の外形だけでなく内部の各部屋の構造や付属物な どをも記述する複雑なものとなる。

巨大かつ複雑なデータである3次元計測点群を、人間が理解して利活用するには、その仲立ちとしての「可視化」が必須である。可視化を行う場合、2 つの方向性が考えられる。第1の方向性は、点を間引いて点数を減らした上で、残った点を繋いでポリゴンメッシュを生成してポリゴンレンダリングを行うことである。インタ

ーネット上の仮想的なミュージアム(デジタルミュージアム)の構築は、主にこの方式で行なわれている。第2の方向性は、最新の可視化技術を駆使して、点群を生データのまま可視化することである。これは、3次元計測点群が記録する完全な情報を活用する可視化であるため、(上手く行えば)非常に精密な画像が得られ、文化財の学術研究にも役立つ。我々の研究では、後者の方向性での可視化をターゲットにしている。

E-mail stanaka@is.ritsumei.ac.jp

我々の研究では、具体的な可視化対象として、京都・祇園祭の山鉾(巡行行事がユネスコ世界遺産)¹⁾、インドネシア・ボロブドゥール寺院(ユネスコ世界遺産)^{2,3}、奈良・當麻寺西塔(国宝)、奈良・玉置神社(ユネスコ世界遺産「紀伊山地の霊場と参詣道」の構成資産)などを設定している。図 1 に、玉置神社の本殿を、UAV を用いて上空からフォトグラメトリのための撮影を行う様子を示す。





図1:玉置神社の UAV (ドローン)を用いた3次元計測

2. 有形文化財の高精細半透明可視化

前述のように、3次元計測点群は、計測対象物の外部だけでなく内部の立体構造をも記録したデータとなる。そこで我々は、これを歴史的建造物などの解析に役立つ高精細半透明可視化に利用する手法を開発した。この手法を「確率的ポイントレンダリング」と呼ぶ10。

確率的ポイントレンダリングは、自然界の半透明物体が透けて見える原理をコンピュータシミュレーションにより再現するという可視化手法である。簡単のため、

VR

半透明物体が、多数の発光粒子が集まって構成されているとする。各粒子から発せられた光は、ある場合には人間の目に到達するが、ある場合には別の粒子に遮られて目には到達しない。任意の粒子から発せられた光が人間の目に到達するかどうかは、予想しようがないので、これは確率現象と捉えるべきである。つまり、半透明物体を構成する各粒子から発せられた光は、ある確率でのみ我々の目に到達する。この確率を適切に設定して、光が目に到達する量の期待値を計算すれば、見える(光が目に到達する)場合と見えない(光が目に到達しない)場合の両者が平均され、「半分見える」状態の画像の生成、つまり半透明可視化を行える。これが確率的ポイントレンダリングの原理である。

確率的ポイントレンダリングの具体的なアルゴリズムは以下のようになる: (1) 3 次元計測点群をランダム分割、(2)得られた各部分点群を画像平面上に投影して中間画像群を作成、(3)得られた中間画像群をピクセル単位で平均して平均画像を作成。この 3 つのステップを踏むことで、3 次元計測点群から高精細な透視画像を生成できる。

確率的ポイントレンダリングの適用例を示す。図2は、 祇園祭で巡行する山鉾のひとつである八幡山を、内部 構造を含めて半透明可視化したもの、図3は、インドネ シアのボロブドゥール寺院の全体を、直接は見えない 地下構造や、石垣の裏に埋められた「隠された基壇」 なども含めて半透明可視化したものである。どちらの場 合も、精密で美しい透視画像が生成されている。

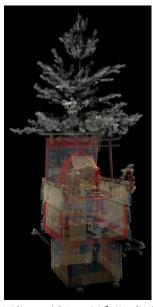


図 2:京都・祇園祭の八幡山の半透明可視化

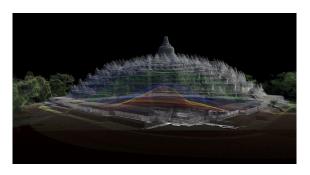


図3:インドネシア・ボロブドゥール寺院の半透明可視化

3. 計測ノイズの自動消去(ノイズ透明化手法)

3次元計測点群には、他のビッグデータには無い難点がある。それは、計測ノイズが含まれるということである。特に、屋外の文化遺跡などでは、様々な気象条件などの影響で計測ノイズが生じやすい。計測ノイズがあると、可視化画像がぼやけたり、本来物体がない場所に点(の集まり)が雲やシミのように描かれたりしてしまう。我々は、この計測ノイズを、半透明可視化において自動的に消去して見えなくしてしまう手法を開発した。この手法を「ノイズ透明化手法」4と呼ぶ。ノイズ透明化手法は、実は、確率的ポイントレンダリングの発展的な応用に他ならない。

計測ノイズを消失させる方法のヒントは、学生時代の 理科の実験の中にある。理科の実験で、例えば電流 の大きさや液体の容量を測る場合、常に実験誤差が 生じる。実験誤差を小さくするには、同じ実験を繰り返 して行い、得られる多数の実験値を平均すれば良い。 確率統計の理論における中心極限定理によれば、こ の平均値は正規分布に従う確率変数となり、その標準 偏差は実験回数の平方根に反比例して減少する。よ って、実験回数を十分に多くすれば、標準偏差がゼロ になり、実験誤差を実質的に(数学的には確率収束の 意味で)消失させられる。この「多数回の実験結果の平 均」を、確率的ポイントレンダリングにおける光が目に 到達する量の期待値計算、すなわち中間画像群のピ クセル単位での平均(平均画像の生成)に置き換えれ ば、実験誤差の消失と同じ原理で計測ノイズを消失さ せることができる。これがノイズ透明化手法である。

ノイズ透明化手法は、3 次元計測点群がビッグデータであることを、困難ではなく利点と捉えて有効利用するものと言える。ビッグデータには「冗長性」がある。冗長性とは、要するに同じ情報の重複である。よって、3 次元計測点群をランダム分割して得られた多数の部分点群は、全て、同じ情報を有する統計的に独立かつ同一なアンサンブルと見なせる。よって、各アンサンブルから得られた画像を平均することで、実験誤差の消失と同様に、計測ノイズを消失させることができる。

図 4 に、これも祇園祭で巡行する山鉾のひとつである船鉾の 3 次元計測データに、人工的に激しいノイズを付与し、そのノイズがランダム分割で得られる部分点群数 L を増やすとともに消失していく様子を示す。一方、図 5 は、現実の計測ノイズの消失を示したものであ

る。京都・藤森神社の境内の森の3次元計測の生データ(処理前なので非常に多くのノイズを含む)に関して、(a)単純に点描して生成した画像と、(b)ノイズ透明化手法で処理して得られた透視画像を比較している。計測ノイズのほとんどが消失し、高精細な透視画像が得られている。

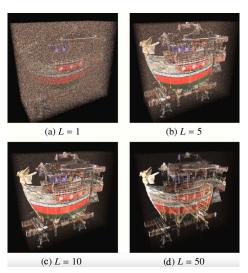
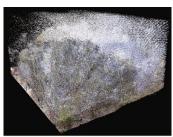


図 4:激しいノイズの消失実験(L はランダム分割で得られる 部分点群数)



(a) conventional point-based rendering



(b) SPBR with L = 100

図 5: 京都・藤森神社の境内の森の計測ノイズ消失実験 ((a): 3 次元計測点群の単純な点描、(b): ノイズ透明化手法 を利用した可視化)

4.3 次元計測点群を活用した VR

3 次元計測点群を入力データとして使って、ユーザが自由に動き回れる仮想的な3次元空間、すなわちサイバー空間を構築することができる。3次元計測を利用した VR(バーチャルリアリティ)である。文化財の3次元計測で取得した、現実世界を正確に記録した点群データを用いてサイバー空間を構築すれば、文化財

の研究やリアリティの高いリモート鑑賞(現地に行かずに行う鑑賞)に活用することができる。また、文化財の説明文などの文字データを、必要に応じて(例えばユーザの空間内での位置や視線に対応して)サイバー空間内でポップアップ表示することもできる。現状では、ポリゴンメッシュ化を経由した VR がまだ多いが、3 次元計測点群をそのまま使った空間構築に関しても、利用できる点数などに制限はあるものの、実装のための環境が整いつつある。

VRの開発環境としては、近年、ゲームエンジンが注 目されている。ゲームエンジンとは、コンピュータゲー ムを作成するためのソフトウェアライブラリと統合型開 発環境のことである。ゲームエンジンは、元々はポリゴ ングラフィックスのためのものであった。しかし最近では、 点群を描画単位とするポイントグラフィックスも可能に なり、3 次元計測点群の直接利用にも道が拓けてきた。 ゲームエンジンには、最先端のコンピュータグラフィッ クス技術が取り入れられており、高度なレンダリング、ア ニメーション、衝突判定などの機能が備わっている。さ らに、作成したサイバー空間を操作するためのユーザ インタフェースも豊富に提供されている。そのため、本 来のゲーム製作という目的を超えて、映像制作、科学 研究支援可視化、産業支援可視化などのためのアプ リケーション開発にも広く利用されるようになってきてい る。3次元計測点群を用いたVRも、ゲームエンジンの 新たな活用法と言えよう。

ゲームエンジンで現在多く利用されているのは、Epic Games 社の Unreal Engine とユニティ・テクノロジーズ社の Unity である。Unreal Engine では、点群の読み込みと描画が可能なプラグインとして、Point Cloud Plugin が公開されている。Unity でも、Point Cloud Viewer & Tools for Unity, Pcx (Point Cloud Importer/Renderer for Unity)など、点群を直接描画できるアセットが公開されている。このような様々なプラグインを用いることで、ハイエンド PC なら、数千万点程度の3次元点群であれば、実時間処理でのポイントレンダリングが可能になってきている。

図 6 は、Unity と Pcx で構築した、ボロブドゥール 寺院のサイバー空間をユーザが体験する様子である。 空間構築には 3 千万点の 3 次元計測点群を用いた。



図 6:3 次元計測点群を利用したボロブドゥール寺院の VR

上で述べたように、ゲームエンジンは、ゲームのシステム構築、そして応用的な使い方としての可視化システムの構築のための、ソフトウェアライブラリ群と統合型開発環境である。しかし、可視化のためのプログラミング環境とも解釈できる。実際、C#言語などを用いて独自の機能拡張を行える。例えば我々は、視点から見て遠方にある点の描画を確率的に省略することによるLOD (level of detail)処理を HLSL 言語で実装した⁵⁾。

5. おわりに

3次元計測点群は、ビッグデータと言えるデータサイズを有し、また、実データに特有の計測ノイズを含む。しかも、点群の可視化にはポリゴンを用いた伝統的なコンピュータグラフィックス技術の多くが使えない。このため、従来の可視化では、計測ノイズを時間浪費して(面倒な手作業も行って)除去した上で、各点に単純に色を付けてそのまま描く単純点描や、データの大幅な間引きや省略、改変を伴うポリゴン変換を経た上でのポリゴンレンダリングが行われてきた。しかし、近年の可視化分野の研究で急速に発展した、大規模点群のポイントレンダリングの技術を使えば、逆に、伝統的なコンピュータグラフィックスには無かった様々な新しい表現が可能になる。本稿では、有形文化財の3次元計測データを主たる対象として、具体的な技術や可視化の実例を紹介してきた。

本稿で述べた研究以外にも、我々は、ボロブドゥール寺院の(写真のみが残された)隠された基壇の壁面レリーフの深層学習による3次元復元⁶、可視化される立体構造の視認性を向上させるための統計的手法によるエッジ強調可視化^{7,8}などの研究を行っている。

3次元計測の利用分野は、今、急速に広がりつつある。文化財、工場、住居、社会インフラ構造物などを全て含んだ都市空間全体を計測して、現実の都市空間の精密なデジタルツインを作成しようという試みも、国内外で多数始まっている。都市空間のデジタルツインは、今後、人流、交通、通信、エンタテインメント等を仮想的に実現する都市空間シミュレーション環境を、我々に提供してくれる。このような、可視化技術を基盤とする新たな社会インフラが実用化される時代は近い。

[謝辞]

有形文化財の3次元計測において、(公財)祇園祭船鉾保存会,(公財)八幡山保存会、藤森神社、當麻寺、玉置神社、奈良県、ボロブドゥール遺跡保存局(BKB)、インドネシア国立研究革新庁(BRIN)、(株)シュルード設計に御協力いただきました。また、本研究の遂行にあたり、立命館大学のアート・リサーチセンターとアジア・日本研究所から様々な支援をいただきました。以上の諸団体および研究機関に心より感謝致します。

本研究の一部は、以下の2件の科研費の支援を得て行われました:国際共同研究強化(B) 19KK0256(2019-2022 年度、研究代表者:田中覚)、基盤研究(A)

21H04903 (2021-2024 年度、研究代表者:田中覚)

[参考文献]

- S. Tanaka, K. Hasegawa, N. Okamoto, R. Umegaki, S. Wang, M. Uemura, A. Okamoto, and K. Koyamada, "See-Through Imaging of Laser-scanned 3D Cultural Heritage Objects based on Stochastic Rendering of Large-Scale Point Clouds," ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., III-5, 2016, pp. 73-80.
- Jiao Pan, Liang Li, Hiroshi Yamaguchi, Kyoko Hasegawa, Fadjar I. Thufail, Brahmantara, Satoshi Tanaka, "Integrated high-definition visualization of digital archives for Borobudur Temple," Remote Sensing, vol.13(24), 2021, p. 5024.
- M. Kawato, L. Li, K. Hasegawa, M. Adachi, H. Yamaguchi, F. I. Thufail, S. Riyanto, Brahmantara, S. Tanaka, "A digital archive of Borobudur based on 3D point clouds," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2021, 2021, pp. 577-582.
- 4) Tomomasa Uchida, Kyoko Hasegawa, Liang Li, Motoaki Adachi, Hiroshi Yamaguchi, Fadjar I. Thufail, Sugeng Riyanto, Atsushi Okamoto, Satoshi Tanaka, "Noise-robust transparent visualization of large-scale point clouds acquired by laser scanning," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 161, 2020, pp. 124-134.
- 5) 中村航希,長谷川恭子,李亮,岡本篤志,田中 覚, "シェーダを用いた詳細度制御の実装による3 次元計測点群の高速表示," 2018 年度精密工学 会秋季大会,函館アリーナ,Sep 5-7, 2018.
- 6) Jiao Pan, Liang Li, Hiroshi Yamaguchi, Kyoko Hasegawa, Fadjar I. Thufail, Brahmantara, Satoshi Tanaka, "3D reconstruction of Borobudur reliefs from 2D monocular photographs based on soft-edge enhanced deep learning," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 183, 2022, pp. 439-450.
- 7) K. Kawakami, K. Hasegawa, L. Li, H. Nagata, , M. Adachi, H. Yamaguchi, F. I. Thufail, S. Riyanto, Brahmantara, S. Tanaka, "Opacity-based edge highlighting for transparent visualization of 3D scanned point clouds," ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., V-2-2020, pp. 373–380, July 2020.
- 8) Weite Li, Kyoko Hasegawa, Liang Li, Akihiro Tsukamoto, Satoshi Tanaka, "Deep learning-based point upsampling for edge enhancement of 3D-scanned data and its application to transparent visualization," Remote Sensing, vol.13(13), 2021, p. 2526.