

インドネシア・ボロブドゥール寺院遺跡における 内部建築構造の復元と透視可視化

Zihao Zhao (立命館大学 情報理工研究科)

Liang Li・長谷川恭子・田中覚 (立命館大学 情報理工学部)

Fadjar I. Thufail (Research Center for Area Studies [P2W], Indonesian Institute of Sciences [LIPI], Jakarta, Indonesia)

近年、3次元計測技術の向上により、大規模な3次元点群が取得可能となっている。それに従い、歴史的価値のある文化財を計測し、デジタルデータとして保存する「デジタルアーカイブ」という仕組みが行われている。しかし、大規模かつ複雑な立体構造を持つ建造物は常に内部に入れるわけではなく、内部構造は計測できない。このため、異なる形式のデータに基づき、文化財を全体的に把握できる融合可視化手法に需要がある。本論文は、インドネシアのジャワ島中部にあるボロブドゥール寺院遺跡を可視化対象とする。計測できない内部の土台を2次元CAD設計図に基づき、Sweep Representation法で3次元ポリゴンデータを作成し、ランダムサンプリングを行って点群を抽出し、計測可能な外部構造の3次元データと融合し、透視可視化を行い、遺跡の内部構造まで視認できるようにする。

Reconstruction of Internal Structure and Transparent Visualization of Borobudur Temple Compounds

Zihao Zhao (Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University)

Liang Li / Kyoko Hasegawa / Satoshi Tanaka (College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University)

Fadjar I. Thufail (Research Center for Area Studies [P2W], Indonesian Institute of Sciences [LIPI], Jakarta, Indonesia)

Recently, based on the rapid development of the laser-scanning technology, large-scale point cloud has been used for digital preservation and researchers of cultural heritage. However, it has been shown that it is difficult to get the internal information of a building with large and complex 3D structure. Therefore, fused visualization based on various formats of data that can observe the entire structure is becoming essential.

In this paper, we propose a method to create 3D data of the internal foundation structure based on the 2D CAD data by using sweep representation and accomplish the fused transparent visualization with the laser-scanned point cloud of the external structure. We applied our method to Borobudur Temple Compounds in Indonesia. As a result, the foundation of Borobudur Temple Compounds has been reconstructed, and both the internal and external structures became visible.

1. まえがき

歴史的建造物や遺跡などは、風化や災害による経年劣化に加えて、観光客による人為的破損の可能性があり、そのような文化財を後世に継承するため、デジタルデータとして保存し、有効利用する機会が増加している。これを「デジタルアーカイブ」[1, 2]という。デジタルアーカイブは国内外で積極的に行われており、文化財のデジタルデータを可視化し、ネットワークを通じて世界に広めて鑑賞や分析をすることができる。

さらに近年では、レーザ計測技術などの3次元計測技術の急速な発展により、立体構造を有する建造物や陶磁器などの計測対象を、3次元点情報として保存する「3次元計測」が注目されている[3]。他にも写真による3次元データ計測やCADによる平面設計図の作成など、様々なデジタルデータ計測方法が活用されている。

本論文は、インドネシア・ボロブドゥール寺院遺跡のデジタルアーカイブ化を支援する。ボロブドゥール寺院遺跡はインドネシアのジャワ島に所在し、世界最大級の仏教石造寺院遺跡である。一辺が約115mの方形基壇の上に5層の方形壇、

さらにその上に3層の円形壇があり、全体で9層の階段ピラミッド状の構造となっている。その方形壇の回廊には1,460面の浮彫彫刻レリーフが敷かれている。しかし、雨季や乾季、メラピ山の噴火と地震などの厳しい自然環境下は遺跡の保存に甚大な影響を与える。加えて、ボロブドゥールは今や年間100万人の観光客が訪れる観光地となっており、人為的な原因での破損等の被害も続いている。そのため、ボロブドゥール寺院全体をデジタルデータ化し、現状を保存することに需要がある。現状では、写真計測によるDEM(数値標高モデル)と地上画像[4]、空中レーザ計測で得られた寺院の3次元モデル[5]、地層のCADデータやレリーフの古写真などがある。ボロブドゥール寺院保護センターは2005年からレーザースキャンを使い寺院の計測を行なっている。現在では、3D-Web技術を用いてBorobudur-Pedia上でボロブドゥール寺院の3次元モデルを見ることが可能になった[6]。



図1 ボロブドゥール寺院遺跡[7]
Figure 1 Borobudur Temple Compounds.

また、ボロブドゥール寺院は、平原の中央にある径約50mの天然の丘のうへ、安山岩や粘板岩の積み上げを土台として、さらにその上に作られている。土台は地質の違いにより、4層に分けられている。内部空間を持たないのが際だった特徴である。しかし、土台を含み、地下の基礎工事部分に関連する資料が少ない、かつ、寺院遺跡の下に隠されて見えないため、データの取得は困難である。現状では、土台の形状を確認できる資料は断面の平面設計図のみである。

そこで本論文では、ボロブドゥール寺院遺跡とその下部の土台の3次元データを融合して可視化することで、ボロブドゥール寺院遺跡のデジタルアーカイブ化を支援することを目的とする。具体的には、内部構造の土台を平面設計図に基づき、3次元データを復元し、レーザ計測で得られた寺院遺跡本体の3次元データと融合して遺跡全体を可視化する手法を提案する。

2. 関連研究

2次元データから3次元データを復元する従来手法には主に三つのものがある。一つ目は多視点

画像を撮影し、各視点の映像においてカメラからの奥行き距離を推定することで3次元データを復元する方法である[8, 9]。二つ目は単画像の消失点情報と透視関係を利用し、3次元データを復元する方法である[10, 11]。三つ目は機械学習を利用して単画像の深度情報を推定し、3次元データを復元する方法である[12]。それらの従来手法には、その摘要に条件がある。消失点や学習データ、或いは多視点で撮った複数枚の画像が必要である。しかし、ボロブドゥール寺院遺跡の地下の基礎工事部分に関する情報は土台の2次元CAD設計図のみであり、それ以外の資料はない。さらに、2次元CAD設計図は土台の断面の形状を表すため、透視関係を推定することができない。

また、計測点群の透視可視化に関する従来研究では[13-15]、ポリゴン、点などの描画要素のデブスソートが必須であり、この処理の計算時間は $n \cdot \log(n)$ (n :ソートする描画要素数)に比例して急速に増大する。さらに、ソートの失敗によるアーチファクトが出現する可能性もある。

そこで本論文では、撮影・計測できない建造物の内部建築構造を復元することを考える。Sweep Representation法で2次元CAD設計図から3次元データを復元し、レーザ計測で得られた3次元点群と融合して透視可視化する。透視可視化手法は確率的ポイントレンダリングを利用する[16]。デブスソートを確率的な期待値計算に置き換えることでソート処理を不要にし、正しい奥行き感を持ちながら、高速でアーチファクトも生じない透視可視化を行うことができる。

3. 提案手法

本節では、ボロブドゥール寺院遺跡の内部建築構造の土台の復元手法と寺院全体の透視可視化手法に分けて記述する。

3-1. 3次元データの復元

2次元のCAD設計図から3次元データを復元するため、Sweep Representation法を利用する。

Sweep Representation法は、2次元データから対称性を持つ3次元データを構築するために利用されている。具体的には、並進スイープを用いて角柱を生成、回転スイープを用いて楕円体やトラスなどの局面を作成することが可能である。

本論文では、ボロブドゥール寺院遺跡内部にある土台の3次元データを作成するため、楕円体や円錐体を作成できる回転スイープを利用する。

2次元データは寺院遺跡内部にある土台のCAD設計図を使用する。CAD設計図には土台の断面の輪郭の座標が書き込まれ、この情報を利用して3次元データを復元する。図2に示すとおり、寺院は土台の上に作られ、土台は地質の違いにより4層に分けている。回転スイープを利用して4層の土台の3次元データを復元する。

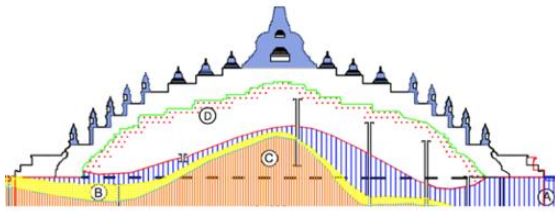


図2 ボロブドゥール寺院遺跡内部建築構造のCAD設計図(Dは第1層, その下のA, B, Cの部分はそれぞれ第2, 第3, 第4層)
(インドネシア・ボロブドゥール寺院遺跡保存局により提供)

Figure 2 The CAD data of the internal structure of Borobudur Temple Compounds.

以下の処理過程を通して復元を行う:

- (1) 土台のCAD設計図から4層の土台の頂点座標をそれぞれ取得してまとめる.
- (2) 図3に示すように, CAD設計図の幾何学中心の+y方向を回転軸として, 本来の点を回転させ, n 個のサンプル点を作成(n :分割数). サンプル点を結んでパスを作成する.

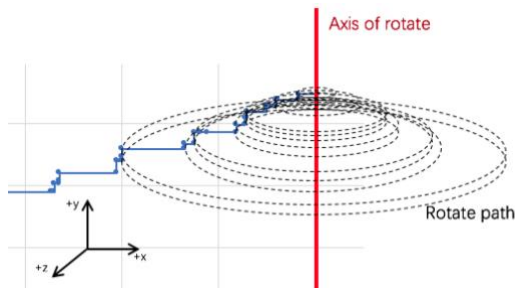


図3 パス作成のイメージ図
Figure 3 The concept of creating path.

- (3) パスを結ぶことによりポリゴンを作成する. 色付けを行い, ポリゴンデータを出力.
- (4) 各層の土台のポリゴンデータにおいてランダムサンプリングを行い, 層ごとに100万点の点群を作成する.

Sweep Representation法は, 2次元形状を回転させることにより3次元データを作成するため, 得られたポリゴンは回転軸に対して対称な形状である. しかし, 本論文で使用するCAD設計図の土台は, 左側の形状と右側の形状が多少異なる箇所がある. そのため, 設計図の左側に基づく組と設計図右側に基づく組に分けて3次元データを作成する. 得られた3次元ポリゴンデータは図5と図6に示す.

そして, 以下の処理過程を通して, ポリゴンデータにおいてランダムサンプリングを行い, 点群を抽出する[17]:

- (1) n 個の頂点を持つポリゴンメッシュは, 一つの頂点と他の点を結び, $n-2$ 個のサブトライアングル(細分割三角形)を作成することができる. それで, 入力されたポリゴンを分割し, 各三角形に対して(2)-(4)の処理を行う.
- (2) 出力点群の総点数を設定し, 一様な点密度で注目三角形における出力点数 m を計算する.

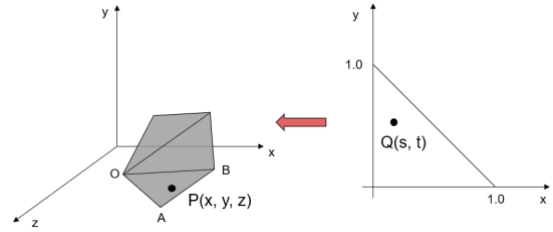


図4 ランダムサンプリングのイメージ図
Figure 4 The concept of random sampling of point cloud.

- (3) 図4に示すように, ある短い辺の辺長1の直角三角形内に, ランダムな座標を生成し, これを点 $Q(s, t)$ とする. 注目三角形の頂点を O, A, B とし, 注目三角形内にあるサンプル点 $P(x, y, z)$ は以下の式で表示することができる.

$$P = O + \overrightarrow{OA} \cdot s + \overrightarrow{OB} \cdot t$$

- (4) (3)を m 回実行することによって, 注目三角形内にランダムサンプリングを繰り返して, 点群を抽出することができる.

上記の方法により, 各層の土台のポリゴンデータにおいてランダムサンプリングを行い, 層ごとに100万点の点群が得られる.

3-2. 確率的ポイントレンダリング

本論文では, 透視可視化手法として確率的ポイントレンダリング(SPBR)を利用する. その理由として, 本論文で扱うボロブドゥール寺院遺跡の3次元点群データは, 可視化対象の外部情報だけでなく内部情報までも含んだ. 大規模かつ複雑な形状を記述するデータであることがあげられる. そのため, 従来の点群の不透明レンダリング手法[18-20]では, 外部情報を把握することはできても, 内部情報まで把握することが困難である. 上述した, 内部構造まで可視化する場合には, 外部情報と内部情報を同時に把握することができる半透明レンダリングが有効である.

加えて, 従来の透視可視化手法に比べると, 本論文で利用する確率的ポイントレンダリングは, 視線方向に対するソートを確率的な期待値計算

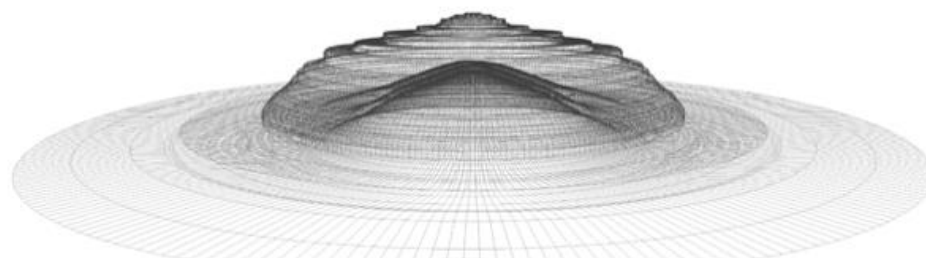


図5 設計図左側に基づく遺跡土台のポリゴンデータ

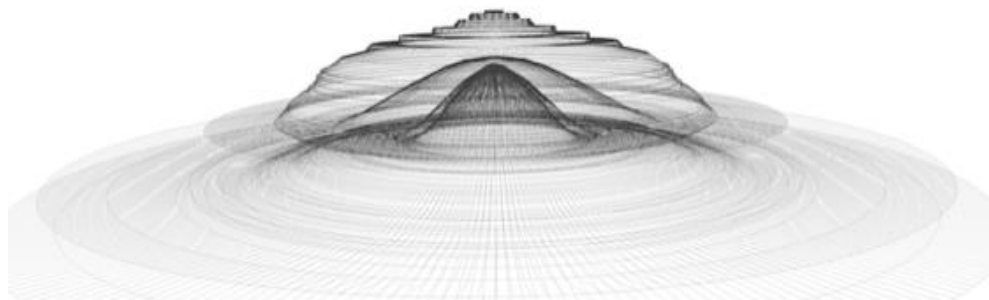


図6 設計図右側に基づく遺跡土台のポリゴンデータ

に置き換えることでソート処理を不要にし、正しい奥行き感を持ちながら、計算時間を減少させ、高速でアーチファクトも生じない透視可視化を行うことができる手法である。

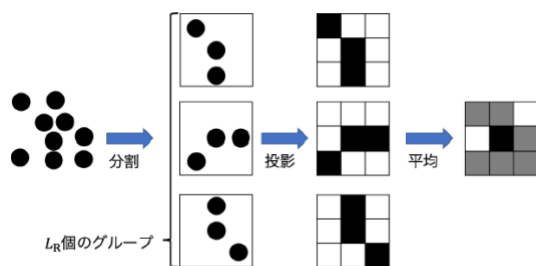


図7 確率的ポイントレンダリングの処理手順
Figure 7 The process of SPBR.

図7に示すとおり、確率的ポイントレンダリングは以下の三つの処理過程を通して半透明可視化が行われる：

- (1) **点生成**：可視化対象となる平面や曲面上に一樣な点密度で点を生成する。可視化される面に対して確率的サンプリング法[21-24]などを用いて生成する。生成する点数は不透明度によって決定される。
- (2) **点投影**：(2)は(1)で生成した3次元点群を、複数のサブグループ、すなわちアンサンブルにランダム分割することである。分割されたアンサンブルの数を、リピートレベル(Repeat Level: L_R)と呼ぶ。各アンサンブルは、統計的にお互いに独立かつ同一な点密度を持ち、含まれる点数は同一とする。分割されたアンサンブルごとに、それを構成する点群を画像平面に投影し、 L_R 枚の中間

画像を生成する。投影の際には、点が不透明であることを反映させるために隠点処理を行う。すなわち、 L_R 枚の中間画像の各ピクセル輝度値は、次の2通りのうちのどちらかとなる。

- A. 点が一つも投影されない場合：ピクセル輝度値＝背景の輝度値。
 - B. 点が一つ以上投影される場合：ピクセル輝度値＝視点に最も近い点の輝度値。
- (3) **ピクセル輝度値の決定**：(3)点投影で生成された L_R 枚の中間画像に対して、対応するピクセルごとに輝度値を平均して、平均画像を生成する。

確率的ポイントレンダリングを用いれば、レーザ計測で得られたボロブドゥール寺院遺跡本体の点群データと前節で述べたCAD設計図を基にして作成された土台の点群データを混ぜ合わせることだけで、内部まで透視可視化することが可能である。

4. 結果

図8と図9は、それぞれCAD設計図左側と右側を基にして復元された3次元データと寺院本体を融合し、透明可視化した結果画像である。地上にある寺院本体だけでなく、関連資料が少なく、かつ計測が困難である下部の土台の3次元データを復元することによって、寺院を全体的に視認することができる。これより、ボロブドゥール寺院は丘の上に複数層の盛土をして土台とし、その上に火山岩で作られた建造物が載っていることがわかる。建造物本体と盛土の位置関係や内部建築構造を視認することができる可能になった。

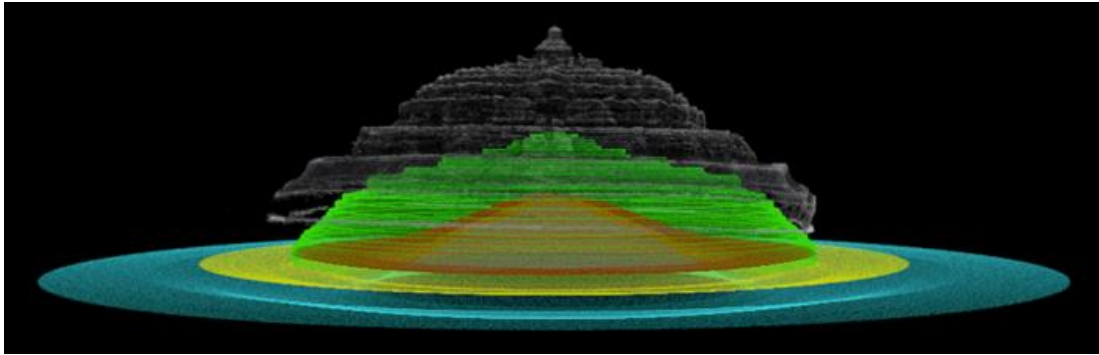


図8 設計図左側に基づく復元された複数層の盛土と寺院遺跡本体の点群の半透明融合可視化結果

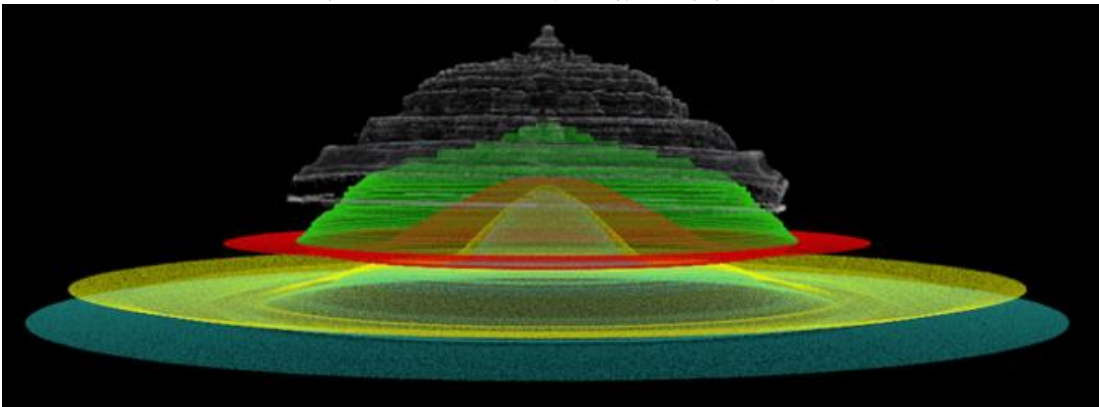


図9 設計図右側に基づく復元された複数層の盛土と寺院遺跡本体の点群の半透明融合可視化結果

5. 結論

本論文では、ボロブドゥール寺院遺跡のデジタルアーカイブ化を支援することを目的とし、既存の3次元データがなく、かつ計測が困難である内部建築構造の土台をCAD設計図に基づいて3次元データを復元し、これを寺院本体の計測データと融合し、透視可視化する手法を提案した。これにより、多種のデータを利用し、ボロブドゥール寺院遺跡の土台と本体を同時に可視化し、内部の構造まで視認することが可能になった。

今後の展望としては、左右非対称問題、視覚ガイドや回廊にある仏像の追加があげられる。提案する3次元復元手法は、Sweep Representation法を利用し、立体性を持つ立体物への適用が前提になるため、本論文では復元結果を設計図左側に基づく組と右側に基づく組に分けて行った。そのため、汎用性を向上し、提案手法の左右の結果を統一するため、補間や曲線の平滑化を行い、3次元データを結合することを今後の課題の一つ目であると考えられる。二つ目としては、等高線、地面や寺院遺跡の断面図などの視覚ガイドと、寺院遺跡の回廊にあるレリーフや仏像の点群データを導入することにより、より視認しやすい位置把握で、ボロブドゥール寺院遺跡全体のデジタルデータを活用することが可能になると考えられる。

本論文に必要なデータの取得に協力していただいたインドネシア科学院(LIPI)とボロブドゥール遺跡保存局に感謝する。

参考文献

- [1] Diane M.Zorich, "A Survey of Digital Cultural Heritage Initiatives and Their Sustainability Concerns," Council on Library and information Resources, 2003.
- [2] Ross Parry, "Digital heritage and the rise of theory in museum computing," *Museum Management and Curatorship*, vol.20, Issue 4, pp.333-348, 2005.
- [3] 八村広三郎, 田中弘美, 田中覚ほか, デジタル・アーカイブの新展開, 八村広三郎, 田中弘美(編), ナカニシヤ出版, 京都, 2012.
- [4] Deni Suwardhi, Fabio Menna, Fabio Remondino, Klaus Hanke, Rizka Akmalia, "Digital 3d Borobudur: Integration of 3d surveying and modeling techniques", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W7, 2015 25th International CIPA Symposium 2015, 31 August-04 September 2015, Taipei, Taiwan.
- [5] Deni Suwardhi, Muhammad Mukhlisin, Dendy Darmawan, Shafarina Wahyu Trisyanti, Brahmantara, Yudi Suhartono, "Survey dan Pemodelan 3D (Tiga Dimensi) untuk Dokumentasi Digital Candi Borobudur," *Jurnal Konservasi Cagar*

- Budaya Borobudur, Volume 10, Nomor 2, Desember 2016, Hal 10-22.
- [6] “Virtual Borobudur”. <http://borobudurvirtual.id/>, (参 2019-08-23)
- [7] Suwardhi D, Menna F, Remondino F, et al. Digital 3D Borobudur-Integration of 3D surveying and modeling techniques[J]. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, 40(5): 417.
- [8] 山田健人, 金澤靖, 金谷健一, 等. 2 画像からの 3 次元復元の最新アルゴリズム[J]. 研究報告 コンピュータビジョンとイメージメディア (CVI M), 2009, 2009(15): 1-8.
- [9] 池谷健佑, 久富健介, 片山美和, 等. 多視点映像からのインテグラル立体像の生成[J]. NHK 技研 R&D (144): 47-59.
- [10] Guillou E, Meneveau D, Maisel E, et al. Using vanishing points for camera calibration and coarse 3D reconstruction from a single image[J]. The Visual Computer, 2000, 16(7): 396-410.
- [11] Wilczkowiak M, Boyer E, Sturm P. Camera calibration and 3D reconstruction from single images using parallelepipeds[C]//Proceedings eighth IEEE international conference on computer vision. ICCV 2001. IEEE, 2001, 1: 142-148.
- [12] Saxena A, Chung S H, Ng A Y. 3-d depth reconstruction from a single still image[J]. International journal of computer vision, 2008, 76(1): 53-69.
- [13] Petar Dobrev, Paul Rosenthal, Lars Linse, “Interactive image-space point cloud rendering with transparency and shadows,” Communication Papers Proceedings of WSCG, The 18th International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, UNION Agency - Science Press, Plzen, Czech Republic, pp.101-108, 2010.
- [14] J.F. Blinn, “Light Reflection Functions for Simulation of Clouds and Dusty Surfaces,” Computer Graphics, vol.16(3), pp.24-29, 1982.
- [15] J. Kajiya and B.V.Herzen, “Ray Tracing Volume Densities,” Computer Graphics, vol.18(3), pp.165-174, 1984.
- [16] 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, pp.73-80, doi:10.5194/isprs-annals-III-5-73-2016, July 2016.
- [17] Turk G. Generation random points in triangles[J]. Graphic Gems, 1990.
- [18] F. Remondino, S. Girardi, A. Rizzi and L. Gonzo, “3d modeling of complex and detailed cultural heritage using multiresolution data,” ACM Journal on Computing and Cultural Heritage, Vol.2, No.1, 2009.
- [19] M. Sainz, R. Pajarola, “Point-based rendering techniques,” Computers Graphics 28 (6), pp.869-879, 2004.
- [20] J. Shan, C. Toth K. (eds), “Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing,” CRC Press, 2008.
- [21] S. Tanaka, A. Morisaki, S. Nakata, Y. Fukuda, H. Yamamoto, “Sampling Implicit Surface Based on Stochastic Differential Equations with Converging Constraint,” Computer & Graphics, Vol.24, No.3, pp.419-431, 2000.
- [22] S. Tanaka, A. Shibata, H. Yamamoto, H. Kotsuru, “Generalized Stochastic Sampling Method for Visualization and Investigation of Implicit Surfaces,” Computer & Graphics Forum (Proceeding of Eurographics 2001), Vol.20, No.3, pp.359-367, 2001.
- [23] S. Tanaka, T. Nakamura, M. Ueda, H. Yamamoto, K. Shino, “Application of the Stochastic Sampling Method to Various Implicit Surfaces,” Computers & Graphics, Vol.25, No.3, pp.441-448, 2001.
- [24] S. Tanaka, Y. Fukuda, H. Yamamoto, “Stochastic Algorithm for Detecting Intersection of Implicit Surfaces,” Computers & Graphics, Vol.24, No.4, pp.523-528, 2000.