

# レーザー計測による 3 次元点群データに基づく 断面図の生成と半透明融合可視化

吉田 賢広 長谷川 恭子 岡本 篤志 田中 覚  
立命館大学 情報理工学部 立命館大学 情報理工学部 大手前大学 史学研究所 立命館大学 情報理工学部

歴史的・文化的な建造物などの 3 次元形状を有する文化財を、レーザー計測によって精密保存する機会が増えている。計測で得られるデータは数千万から数億個以上の 3 次元点群データである。本論文では、このような大規模 3 次元点群を、できるだけ加工せずにそのまま利用して、計測対象の内部構造を分かりやすく可視化する手法を提案する。具体的には、最近我々が提案した粒子ベース・レンダリングをレーザー計測データに適用する。また、計測された点群から、計測対象の任意平面における断面線を自動生成し、これを平面図、立面図などの断面図として 3 次元形状と融合して半透明可視化する。

## Creation of Cross-Section Drawings and Translucent Visualization based on a Laser-Scanned 3D Point Cloud

Takahiro Yoshida Kyoko Hasegawa Atsushi Okamoto Satoshi Tanaka  
Dept. of Media Technology Dept. of Media Technology History Research Institute Dept. of Media Technology  
Ritsumeikan University Ritsumeikan University Otemae University Ritsumeikan University

Recent rapid development of laser scanners has enabled precise measurement of real 3D objects that are important for cultural and historical reasons. The laser-scanned data are a point cloud that often consists of over  $10^7$  or  $10^8$  3D points. We propose a novel application of the particle-based rendering to such large-scale laser-scanned 3D point data. Based on the rendering method, we execute precise translucent visualization of complex laser-scanned buildings. We also automatically create a cross-section drawing of a building from its laser-scanned 3D points. We make fused translucent visualization of the created 2D drawing with the 3D structure of the building.

### 1. まえがき

近年の 3 次元計測装置、特にレーザー・スキャナの急速な発展は、文化的・歴史に重要な大規模遺跡や大規模建造物の精密計測を可能にした[1,2]。レーザー計測で得られるデータは、3 次元点群データである。大規模遺跡の計測などでは、しばしば、数千万点から数億点規模の大規模な 3 次元点群が得られる。例えば、我々が最近行った 3 つの大規模遺跡の計測では、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 3 次元点群が取得された。

上のような大規模なレーザー計測データの特徴は、その大きさだけでなく、データが記述する 3 次元形状の複雑さにある。例えば、現代の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、あとから両者を合成して、建物全体の完全な 3 次元データを構成することも容易である[1,2]。こうして得られたデータは、建物の外形だけでなく、内部の各部屋の構造や付属物を記述するものとなる。このようなデータを人間が解析し利用するためには、透視すなわち半透明可視化が極めて有効である。

レーザー計測データの半透明可視化には、従来、2 つの方法があった。

第 1 の方法はポリゴン・レンダリングである。計測で得られた点を頂点として結んでポリゴン（多角形）の集合を作成し、各ポリゴンを半透明 CG で描くというものである。半透明効果の実現には、アルファブレンディング[3]など、CG の分野で確立している手法を利用する。しかし、計測時のノイズなどの影響で、歪（いびつ）なポリゴンが多数出現し、これが生成画像の品質を大きく下げる。歪なポリゴンの出現を抑えるためには、原データから多数の点を廃棄するしかない。これでは精密な可視化は期待できない。さらに、正確な半透明効果を実現するためには、全てのポリゴンをあらかじめ視線方向に並べて（ソートして）奥のポリゴンから順に描いていく必要がある。これにはポリゴン数を  $n_{\text{pol}}$  とし、 $n_{\text{pol}} \log n_{\text{pol}}$  に比例する計算量が必要である。このため、大規模な計測データの精密可視化においては、対話的な描画速度の実現は困難である。

レーザー計測データの半透明可視化のための第 2 の方法は、計測で得られた点群をそのまま描画の

単位として描くポイントレンダリング，すなわちCGによる点描である[4-6]。点を適当に間引いて密度を小さくすれば，疑似的に透視効果を実現することができる。しかしこの方法でも，透明度を増すためには原データから多くの点を廃棄しなくてはならない。逆に言えば，可視化の精密度を増すために多くの点を使えば使うほど透視効果が下がり，深奥部の内部構造が見えにくくなってしまふ。

本論文では，大規模なレーザ計測データの半透明可視化のための手法を提案する。我々は，最近我々が提案した，点群のソート処理が不要な粒子ベース・レンダリング[7,8]を，レーザ計測で得られた3次元点群に適用する。また，計測で得られた3次元点群から断面図を自動生成し，これを3次元形状と融合して半透明可視化する手法を提案する。これにより，設計図の存在しない建造物の内部構造把握が容易になる。

## 2. 粒子ベース・レンダリング

### 2.1 粒子ベース・レンダリングの概要

我々の目的は，大規模レーザ計測で得られた原データをできるだけ加工せずに，かつデータの部分的な棄却を行わずに全体を使って，計測された3次元形状の高精細かつ高速な半透明可視化を実現することにある。この目的のために，我々は，最近我々が提案した粒子ベース・レンダリング[7,8]を応用する。

粒子ベース・レンダリングは，もともと全く別の目的で開発されたものである。すなわち，医用CT画像群などのボリュームデータの等値面を高精細に半透明可視化するための手法である。ポリゴン・レンダリングがポリゴンを描画単位として可視化を行うのに対し，粒子ベース・レンダリングでは不透明な発光粒子を描画単位とする。粒子が持つ属性は，発光色，大きさ，法線ベクトルなどである。粒子の大きさは，画像平面に投影した像が丁度1ピクセルの大きさになるように設定する。

粒子ベース・レンダリングの実行手順は，図1にも示すように，以下の通りである：

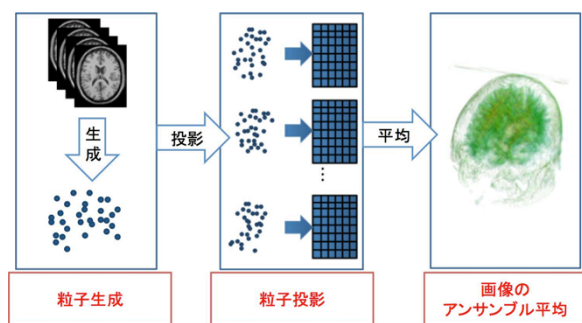


図1 粒子ベース・レンダリングの手順  
Figure 1 Steps of particle-based rendering.

1. **粒子生成**: 可視化対象となる曲面または平面上に，一様な点密度で粒子群を生成する。
2. **粒子投影**: まず，上で得られた粒子群を複数のグループにランダム分割する。次に，各グループの粒子を，ピクセル単位の隠点処理を行いつつスクリーンに投影し，グループ毎に画像を生成する。
3. **画像のアンサンブル平均**: 全てのグループの画像をピクセル毎に平均し，最終的な画像のピクセル輝度値を決定する。

上記の処理手順を通じて，半透明効果すなわち透視効果は，「画像のアンサンブル平均」の際に，各ピクセルに複数の粒子グループから，視点から様々な距離にある粒子の色情報が取り込まれることで実現する。また，粒子グループごとの隠点処理によって，正しい奥行き感が実現される。

上記の処理手順が視線方向のソートを全く含まないことに注意されたい。半透明効果は，粒子の視線方向のソートではなく，隠点処理と確率的アルゴリズムによって実現されている。ソート処理が不要であることが，大規模データの対話的速度での可視化を実現する。さらに，半透明ポリゴン・レンダリングで頻出する，ソート結果の誤りや不定性に由来するアーチファクト（あり得ない縞模様など）の出現も回避できる。

可視化する曲面の不透明度  $\alpha$  は，曲面上に生成する粒子数を通じて，次式に従って制御できる[7]:

$$\alpha = 1 - \left(1 - \frac{s}{S}\right)^{n_{\text{sum}}/L_R} \quad (1)$$

ここで， $n_{\text{sum}}$  は全粒子グループの粒子数の和， $s$  は粒子の断面積， $S$  は曲面の面積， $L_R$  は粒子グループの数である。 $L_R$  は第3手順「画像のアンサンブル平均」の際に平均される画像の枚数に等しい。よって，ユーザにとっては， $L_R$  は最終的に生成される画像の画質を制御するパラメータとなる。

### 2.2 レーザ計測データへの適用

我々のアイデアは，レーザ計測データを半透明可視化する際に，ポリゴン化などを行わず，計測で得られた3次元点群をそのまま粒子と見なして粒子ベース・レンダリングを行うというものである。レーザ計測で得られた3次元点群をそのまま利用するのであるから，粒子があらかじめ用意されていると考えて良い。このため，第1の手順「粒子生成」を省略することが可能である。これは，面倒な前処理をせずに，計測の現場でも簡単に半透明可視化を行えることを意味する。これは，提案手法の有用な特長のひとつである。

ただし，粒子があらかじめ用意されていることは，粒子数もあらかじめ決まっていることを意味する。これは，画質を定めるユーザパラメータ

$L_R$  が指定されていると仮定すれば、式(1)に従って実現される不透明度  $\alpha$  も決められてしまっていることを意味する。また、式(1)の右辺で用いられる面積  $S$  (レーザ計測データの場合は計測対象の表面積) の算出も困難である。よって、何らかの工夫を施さなければ、ユーザは不透明度を制御できない。

そこで我々は、以下の 3 つの技法を開発した。これらは、言わば、与えられたレーザ計測データに対して、ユーザが指定した不透明度  $\alpha$  と粒子グループ数  $L_R$  に対応する粒子数  $n_{\text{sum}}$  を実現するための技法である。

1. **計数球による粒子数計測**：計測点群データから元の計測対象の表面積を知ることは困難である。このため、点分布の一様性を仮定し、計測対象の一部の局所領域に必要な粒子数の計算を行う。まず、ランダムに選択した計測点を中心とする小さな球を考える。この球を、以後「計数球」と呼ぶことにする(図 2 参照)。計数球の大円を、粒子数の計算を行う局所領域とし、その面積を  $S$  とする。計数球に含まれる点(粒子)を探索し、その数を  $n_{\text{raw}}$  とする。実用上は、複数の計数球を用意し、各計数球内の粒子数の平均を  $n_{\text{raw}}$  とする。
2. **粒子の増殖・削減**：式(1)より、ユーザが指定した  $\alpha$  と  $L_R$  に対応する  $n_{\text{sum}}$  が求まる。増殖率  $k = n_{\text{sum}} / n_{\text{raw}}$  を求め、 $k \neq 1$  の場合は、粒子群全体で粒子数を  $k$  倍する。粒子分布の一様性により、計数球内でも粒子数は  $k$  倍される。 $k < 1$  の場合は、ランダムに粒子の間引きを行えば良い。 $k > 1$  の場合は、ランダムに選んだ粒子群に対して必要数のコピーを生成する。全く同じ粒子であっても、 $L_R$  が十分に大きければ、手順の 2 番目の「粒子投影」における隠点処理で棄却されることはほとんどない。これは、以下に述べるランダム分割技法を実行すると、元の粒子とコピー粒子が別々のグループに配置され、それぞれ独立な粒子として扱われるからである。
3. **粒子群のランダム分割**：粒子の増殖・削減を行って得られた粒子群をシャッフルし、 $L_R$  個の統計的に独立なグループに分割する。

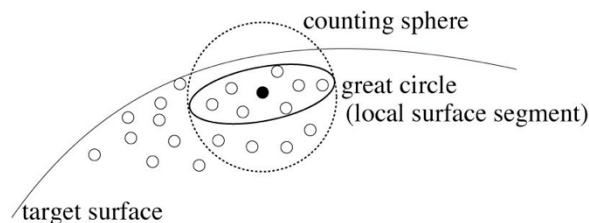


図 2 計数球  
Figure 2 Counting sphere.

従来の第 1 手順である「粒子生成」に替えて、上記の 3 つの技法を順に実行すれば、統計的に独立な  $L_R$  個の粒子グループが得られる。そして、計数球に含まれる各粒子グループの粒子数の総和は、ユーザが指定した不透明度  $\alpha$  に対応するものになっている。これらの粒子グループを用いて、続く「粒子投影」、「画像のアンサンブル平均」の手順を実行すれば、ユーザが望む不透明度での半透明可視化が行える。

### 3. 計測点群による断面図の自動生成

上述のように、我々は、レーザ計測で得られた 3 次元点群をポリゴン化などの特別な加工をすることなく、そのままレンダリングに利用する。同様に、通常は手作業でポリゴン化した上で CAD ソフトなどを用いて作成する断面図を、計測で得られた点群データから直接自動生成する。その手順は、図 3 にも示すように、以下のようなものである。

- (a) 切り出したい平面を中央面とした微小幅  $dz$  内に存在する点群を抽出する。
- (b) 抽出した点群を中央面に投影する。
- (c) 投影された点を、必要に応じて加工(細線化・太線化など)し、断面線とする

上記の手順により、点群から構成される断面線で描かれた断面図の生成が可能になる。このような方法で断面線が得られるのは、建造物の計測点群の性質のためである。まず、建造物という計測対象は、ほとんどの高さで、鉛直方向の微小な幅においてその形状が急激に変わることはない。そのため、微小な幅で計測点群を抽出し、その点群を一平面に投影すれば、その平面上の断面線が得られる。次に、現代の高精度なレーザ計測においては、計測点群の点間隔は非常に短い。そのため、抽出した点を投影することで大きく途切れることのない断面線が得られる。

## 4. 実験

### 4.1 実験環境と計算速度

ここでは、上記の 3 つの技法すなわち「計数球による粒子数計測」、「粒子の増殖・削減」、「粒子群のランダム分割」を通じて、レーザ計測データに粒子ベース・レンダリングを適用し、半透明可視化した実験結果を示す。また、断面図の自動生成と、2 次元断面図と 3 次元建造物の半透明融合可視化の例も示す。

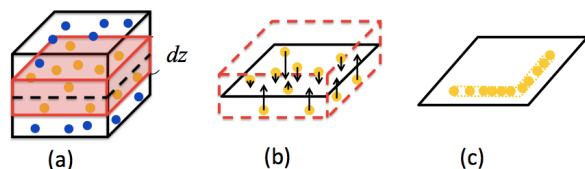


図 3 断面線の自動生成の手順  
Figure 3 Steps of automatically creating cross-section lines



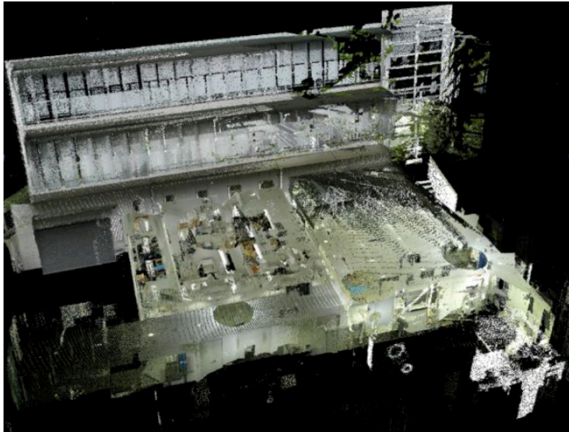


図 4 大学キャンパス内の建造物のレーザ計測データ ( $1.91 \times 10^7$  点)

Figure 4 Laser-scanned data of a campus building ( $1.91 \times 10^7$  points).

可視化に用いた計算機は、CPU が Xeon X5690 (3.46GHz), 主メモリが 144 GB, GPU が NVIDIA GeForce GTX 580 の Linux PC である。この計算機上で、少なくとも  $10^9$  個の粒子を扱えることを確認した。(CPU が Intel Core i7 (3.07 GHz), 主メモリが 8GB, GPU が NVIDIA GeForce GT 480M, のノート PC でも、 $10^8$  粒子までは扱えた。) 粒子ベース・レンダリングは、GLSL を用いた GPU プログラミングで実装した。可視化の平均計算速度は、 $10^7$  粒子で 5.0 fps,  $10^8$  粒子で 1.7 fps,  $10^9$  粒子で 0.17 fps であった。これらは実時間的な速度とまでは言えないが、対話的速度での可視化と言える。

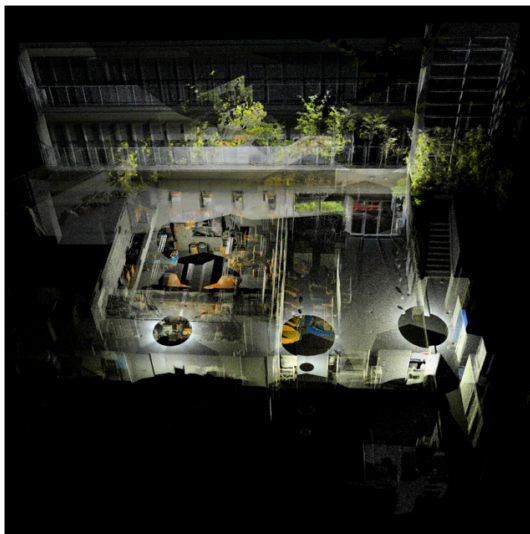


図 5 図 4 のデータの半透明可視化  
Figure 5 Translucent visualization of the data of Fig. 4.

#### 4.2 大学キャンパス建造物の可視化

図 4 に、大手前大学の史学研究所の建物を、外部と内部からレーザ計測し、両者のデータを統合して得られた 3 次元点群データを示す。点数は  $1.91 \times 10^7$  個である。可視化には、通常の不透明なポイントレンダリングを用いている。図 4 から分かるように、現代のレーザ計測で得られる 3 次元点群データは高密度であり、間引きを行って一部の点を捨てない限り、半透明効果 (透視効果) は期待できない。

図 5 は、図 4 の 3 次元点群に粒子ベース・レンダリングと上記の 3 つの技法を適用して、半透明可視化したものである。不透明度は  $\alpha=0.2$ , 粒子グループ数 (画質パラメータ) は  $L_R=1000$  である。粒子の増殖率は  $k=8.09$  であり、粒子数は  $1.54 \times 10^8$  に増やされている。図 5 を見ると、半透明効果により、建物内の部屋の配置や部屋内の家具の配置などがよく分かる。部屋の配置は、設計図が現存する場合は、それを見れば分かる。しかし、建築後の部屋の使用状況、建築後の破損状況などは、設計図からは分からない。レーザ計測で得られた実測データに対して半透明可視化 (3 次元的な透視) 実行することで、通常的设计図からは得られない、現実の建造物に関する 3 次元的な情報を読み取ることができる。

#### 4.3 古民家の可視化

レーザ計測によって取得した、木造平屋の古民家である旧中島家住宅 (滋賀県・栗東歴史民俗博物館所蔵) の計測点群のデータを用いて、可視化実験を行った。図 6 は計測対象の写真、図 7 は、図 4 と同様な、レーザ計測で得られた 3 次元点群をそのまま不透明ポイントレンダリングで表示したものである。計測で得られた点数は、建物の部分のみで  $2.95 \times 10^7$  個である。



図 6 レーザ計測した古民家の写真 (滋賀県・栗東歴史民俗博物館所蔵)

Figure 6 Photograph of the laser-scanned old folk house in the possession of Ritto Museum of History and Ethnos (Shiga, Japan)



図7 図6の古民家のレーザ計測データ  
( $2.95 \times 10^7$ 点)

Figure 7 Laser-scanned data of the old folk house of Fig.6 ( $2.95 \times 10^7$  points)

図8に、図7のデータを提案手法で半透明可視化したものを示す。増殖されて得られた粒子数は $1.81 \times 10^8$ 個である。視認性を向上させるため、各粒子に付与されている色に関して、明度と彩度を調整している。図8を見ると、壁や障子などが透けて見え、外部からでも民家の内部が見て取れることが分かる。

次に、断面図の自動生成の例を示す。図9の中に示す上下幅内で点群を取得し、幅の中央面に投影して断面図を作成した。線を太くして見やすくするため、画像上で太線化の処理を行っている。結果として得られた断面図を図10に示す。各部屋の配置が明確に表示された断面図が得られている。家具なども描かれているところは通常的设计図と異なるが、言い換えれば、部屋の配置に加えて部屋の利用状況をも示した図となっている。

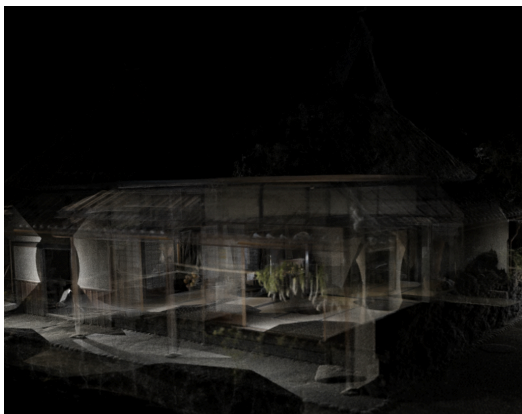


図8 図7のデータの半透明可視化

Figure 8 Translucent visualization of the data of Fig.7



図9 断面図作成のための点群取得範囲

Figure 9 Range for acquiring points to create a cross-section drawing

我々は、図10のような断面図を、そのまま建築用の正式な設計図として利用できるかと主張するわけではない。我々の目的は、建築用の本格的な設計図の作成を支援することにある。例えば、設計図の存在しない歴史的な建造物などをCADデータ化する際に、図10のような断面図を参照しながら正式な設計図を作れば、従来は数週間かかっていた煩雑な作業が大いに短縮される可能性がある。

図11は、図10の断面図を元の3次元データと半透明に重ねて、建造物の2次元構造と3次元構造を同時に見られるようにしたものである。通常、人間は2次元の断面図を見ながら3次元的な構造のイメージを脳内で構築する。これを支援することを意図した可視化である。

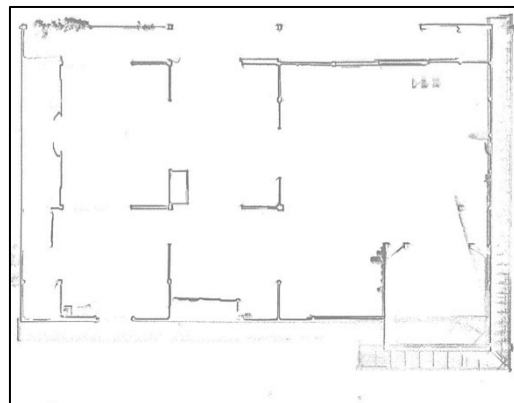


図10 図7のデータから自動生成した断面図

Figure 10 Cross-section drawing automatically created from data of Fig.7.

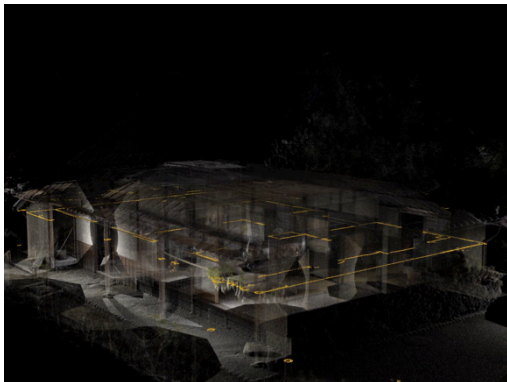


図 11 2次元断面図と3次元データの融合可視化  
Figure 11 Fused visualization of a 2D cross-section drawing and the 3D data

## 7. あとがき

本論文では、レーザ計測で得られる複雑な3次元構造を記述する大規模3次元点群データを、医用ボリュームデータなどの可視化のために最近我々が開発した粒子ベース・レンダリングを応用して、高精細かつ対話的な速度で半透明可視化する手法を提案した。粒子ベース・レンダリングは、半透明可視化のアルゴリズムでありながら、従来手法のように描画単位となる形状を視線方向にソートする必要が無く、高速可視化が可能である。また、ソートの失敗に起因するアーチファクトの心配も無い。

また、レーザ計測で得られた3次元点群を元にした断面図の自動生成法を提案した。断面図の生成においては、建造物の計測点群の性質に着目し、切り出す平面を中央とした微小幅に含まれる点群を一平面に投影することで断面線の生成を実現した。また、生成した断面線ともとの3次元データを半透明融合して可視化することで、不明瞭になりがちな奥行き情報を補い、平面的な構造が把握しやすい可視化となった。

今後は提案手法を、建造物以外のレーザ計測データに適用できるようにしていきたい。また、水平面だけでなく、任意方向の断面図の自動生成にも取り組むつもりである。

レーザ計測に協力して下さった、栗東歴史民俗博物館の中川敦之様、大西稔子様に感謝いたします。また、研究上の有益な助言をいただいた京都大学の小山田耕二先生、坂本尚久先生に感謝いたします。

## 参考文献

1) J. Shan and C.K. Toth, editors, “Topographic Laser-Ranging and Scanning: Principles and Processing”, CRC Press, 2008.

2) G. Heritage and A. Large, editors, “Laser Scanning for the Environmental Sciences”, Wiley-Blackwell, 2009.

3) Dave Shreiner, Graham Sellers, John M. Kessenich, and Bill M. Licea-Kane, “OpenGL Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL, Version 4.3 (8th Edition)”, Addison-Wesley Professional, 2013.

4) M. Sainz and R. Pajarola, “Point-based rendering techniques”, *Computers & Graphics*, 28(6), pp.869–879, 2004.

5) L. Kobbelt and M. Botsch, “A survey of point-based techniques in computer graphics”, *Computers & Graphics*, 28(6), pp.801–814, 2004.

6) M. H. Gross and H. Pfister, eds, “Point-Based Graphics”, Series in Computer Graphics, Morgan Kaufmann Publishers, 2007.

7) S. Tanaka, K. Hasegawa, Y. Shimokubo, T. Kaneko, T. Kawamura, S. Nakata, S. Ojima, N. Sakamoto, H. T. Tanaka, and K. Koyamada, “Particle-based transparent rendering of implicit surfaces and its application to fused visualization”, In Proc. EuroVis 2012, pp.25-29 (short paper), 2012.

8) K. Koyamada, N. Sakamoto, and S. Tanaka, “A particle modeling for rendering irregular volumes”, In Proc. International Conference on Computer Modeling and Simulation (UKSIM 2008), pp.372–377, 2008.