

確率的ノイズ透明化と輝度調整を用いた 大規模3次元計測点群の高品質透視可視化

内田 知将[○](立命館大学), 長谷川 恵子(立命館大学),

李 亮(立命館大学), 田中 覚(立命館大学)

High-Quality Transparent Visualization of Large-Scale Point Clouds

Acquired by 3D Scanning

Tomomasa UCHIDA, Kyoko HASEGAWA, Liang LI and Satoshi TANAKA

ABSTRACT

The recent rapid development of 3D scanning technology, i.e., laser-scanning and photogrammetric scanning, has enabled us to record large-scale 3D point clouds that describe very complex 3D shapes such as cultural heritages, buildings, and equipment in factories. At the same time, we need to realize comprehensible visualizations that help researchers and engineers to analyze, understand, and use the 3D scanned point clouds. In this research, we focus on large-scale 3D scanned point clouds that have tens of millions to hundreds of millions of points. We propose a new method of noise reduction that effectively utilizes the redundancy caused by large-scale to improve the image quality. Furthermore, we also propose a method of brightness adjustment to improve the visibility of the visualized transparent image by amplifying pixel values.

Keywords: Noise-robust, Transparent visualization, Large-scale 3D scanned point cloud, Stochastic noise transparentization, Brightness amplification

1. 序論

歴史的に重要な文化財をデジタルデータとして保存し、活用していくための取り組みとして、「デジタルアーカイブ」が国内外で積極的におこなわれている¹⁻³⁾。また、近年の計測技術の急速な発展により、実世界の3次元物体を、点群としてデジタル的に取得することが可能となつた^{4,5)}。取得された点群は、数千万から数億点にも及ぶ大規模データである。こうした背景の中、取得した点群データを有効に活用するために様々な研究がおこなわれている。しかし、ユーザが分析、理解、活用することを支援する、分析型の可視化手法の開発にはほとんど取り組まれていないのが現状である。特に、本論文で可視化対象とする文化財、建築物、工場などの点群データは、複雑な3次元形状を記述していることがほとんどであるため、分析型可視化は重要である。このような大規模3次元計測点群の可視化を試みる場合、一般的に用いられている従来の不透明可視化では、可視化対象の内部形状を把握できないという問題がある。この問題を解決するには、可視化対象を「透視・半透明化」することが有効である。すなわち、実世界上では手前のサーフェスに視線が遮られて見えるはずのない、奥深い内部のサーフェスを、コンピュータシミュレーションを用いて描画することで、内部と外

部の情報を同時に把握、分析することを可能にすれば良い。したがって、3次元計測によって取得された大規模かつ複雑な点群の分析を目的とした、高精細かつ高視認性を満たす透視可視化手法の確立が必要とされている。

我々は最近、大規模3次元点群に適した透視可視化手法として、確率的ポイントレンダリング（Stochastic Point-based Rendering : SPBR）⁶⁻⁸⁾を提案した。3次元計測で取得された計測点群には、点密度が高く、点が冗長であるという特徴がある。従来の不透明可視化では、計測点群の点数が必要以上に多いため、点群の冗長性を十分に活かしきることができない。一方、SPBRでは、計測点群の冗長性を、最終的に生成される半透明画像の画質向上のために有効利用している。

本論文では、SPBRの生成画像が高品質である理由として、我々が「ノイズの透明化」と呼ぶノイズの自動消失効果について検証する。そして、この効果を積極的に活かし、輝度値の最適化まで含めて、ノイズに対してロバストかつ高視認性を満たす透視可視化手法として確立させる。

2. 確率的ポイントレンダリング

SPBR による半透明画像生成のアルゴリズムは、以下の 3 つのステップから構成される：

ステップ1（点分割）：与えられた計測点群を、複数のアンサンブル点群にランダム分割する。各アンサンブル点群は、統計的に独立かつ点密度が一様である必要がある。また、アンサンブルの数をリピートレベルと呼び、以降は変数 L で表記する。

ステップ2（点投影）：ステップ1でランダム分割した L 個のアンサンブル点群を、アンサンブルごとに画像平面に投影し、 L 枚の中間画像を生成する。画像平面に点を投影する際は、点が不透明であることを反映させるために、ピクセル単位の隠点処理をおこなう。すなわち、各中間画像の各ピクセルの色は、背景色または、視点から最も近い点の色となる。この隠点処理によって、最終的な半透明画像において、正しい奥行き感覚を実現できる。

ステップ3（画像平均）：ステップ2で得られた L 枚の中間画像について、対応するピクセルごとに RGB 各輝度値をアンサンブル平均処理する。この平均処理によって得られた平均画像が、最終的な半透明画像となる。中間画像の枚数、すなわちアンサンブル数 L は、画質（統計的な精度）をコントロールする変数として機能する。

以上の 3 つのステップを実行することで、最終的に半透明画像を生成することができる。従来、半透明可視化の実現には、多くの計算量を要する点群やポリゴン群のデプスソートが必要であった。しかし、上記のステップの中には、デプスソートは一切含まれていない。したがって、SPBR は、正確な奥行き感覚を実現する半透明画像を、高速に生成することができる半透明可視化手法であるといえる。Fig. 1 に、 $L = 3$ の場合における SPBR の各ステップの概略図を示す。

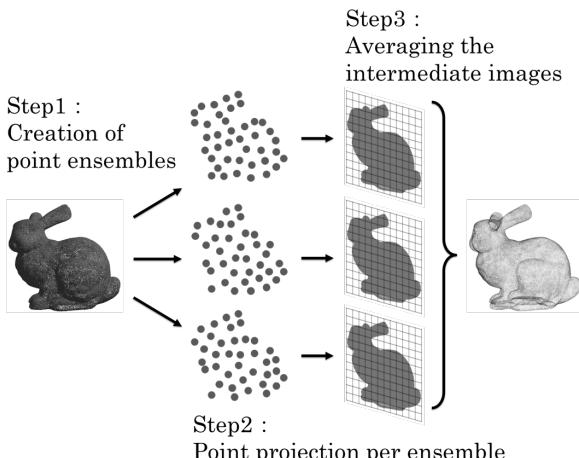


Fig. 1 Outline of each step of SPBR with $L = 3$

3. 確率的ノイズ透明化

本論文では、SPBR に内在している自動ノイズ削減効果を「確率的ノイズ透明化（Stochastic Noise Transparentization）」と呼ぶ。確率的ノイズ透明化は、SPBR のアルゴリズムのステップ 3 である、 L 枚の中間画像の対応するピクセルごとのアンサンブル平均処理で実現される。すなわち、ノイズを除去するのではなく、ノイズを透明化して見えなくしている。また、アンサンブル数が多いほど、アンサンブル平均処理の統計的な精度が向上するため、 L を上げることでノイズ透明化の効果を強めることができる。さらに、平均処理はピクセル単位でおこなうため、解像度が低下することがなく、高精細なノイズ透明化を実現できる。

本章では、確率的ノイズ透明化の効果を定量的に評価する。さらに、ノイズを含んだ様々な計測点群に対して適用することで、その効果を実証する。

3.1 計測点群におけるノイズ

3 次元計測の中でも、特にレーザ計測では、レーザ光の散乱が原因で位置を誤計測してしまった結果、本来点が存在していないはずの位置にノイズが生じてしまう。計測ノイズは、主に、ランダムノイズとアウトライアの 2 種類のノイズに分類することができる。ランダムノイズは、正しい位置を中心として、その周辺に点がばらついて分布しているノイズである。点群にランダムノイズが存在していると、最終的に得られる画像内に不正確な色分布が発生し、色がぼやけてしまう。一方、アウトライアは、正しい位置から大きく離れた位置に点在するノイズである。一般的に、これらの計測ノイズを取り除くためには、3 次元空間上で、人為的に除去する作業が必要である。しかし、確率的ノイズ透明化であれば、2 次元的にノイズを透明化することで、最終的に得られる半透明画像において、ノイズの影響を自動で抑制することができる。

3.2 検証実験

本節では、確率的ノイズ透明化の効果を定量的に評価する。さらに、前節で説明した 2 種類のノイズの模擬ノイズを、計測点群に人工的に付与した上で、 L を変更してノイズ透明化を適用し、その効果を検証する。

3.2.1 定量評価実験

定量評価の実験方法について述べる。まず、3 次元空間上に、一様分布に従って正方形の点群を人工的に生成する。このとき、点の数は 1.0×10^7 点とし、点の色は白色とする。次に、この正方形点群からランダムに 10% の点を選択し、3 次元ガウス分布にしたがって元の点の位置をずらすことで、ノイズ点群を生成する。このとき、ガウス分布の分散は 1.0×10^{-5} とし、ずらした点は赤色にする。以降では、正方形点群から生成した画像を「元画像」、ノイズ点群から生成した画像を「ノイズ画像」と呼ぶ。定量評価の指標には、正規化した平均二乗誤差（Normalized Mean Square Error : NMSE）を用いる。NMSE は、比較する 2 枚の画像（基準画像と評価画像）の類似性を評価

する指標である。基準画像を I 、評価画像を K 、画像サイズを $l \times m$ とすると、NMSE は以下の式(1)で表される：

$$\text{NMSE} = \frac{\sum_{i=0}^{l-1} \sum_{j=0}^{m-1} \{I(i,j) - K(i,j)\}^2}{\sum_{i=0}^{l-1} I(i,j)^2}. \quad (1)$$

本検証では、基準画像が「元画像」で、評価画像が「ノイズ画像」である。NMSE は、評価画像が基準画像に類似しているほど小さい値になる。したがって、ノイズ画像が元画像に類似するほど、NMSE の値は小さくなる。Fig. 2 に、 $L = 1 \sim 150$ における、元画像とノイズ画像との NMSE の値の推移を示す。 $L = 1$ では、NMSE の値は 20.5 という高い値であったが、 $L = 10$ で急激に減少し、その後も L を上げる（アンサンブル数を増やす）につれて減少していくことが確認できる。これは、 L を上げるにしたがって、ノイズ画像のノイズが削減された結果、元画像に類似するようになったと解釈できる。したがって、SPBR による確率的ノイズ透明化効果が正常に機能しているといえる。また、この結果から、 L が小さい値であっても、十分にノイズ透明化効果が得られるということも確認できる。

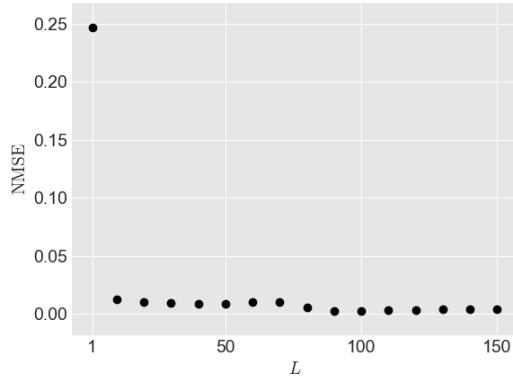


Fig. 2 NMSE between the original and noisy image at each ensemble number ($L = 1$ to 150)

3.2.2 模擬ノイズ付与実験

模擬ノイズ付与による検証実験について述べる。本検証では、Fig. 3 に示す、京都祇園祭で巡行をおこなう山鉾である「船鉾」の計測点群に、人工的に模擬ノイズを付与した点群を用いる。模擬ノイズは、ランダムノイズとアウトライアーノイズの2種類に分けて付与する。ランダムノイズの模擬ノイズとしては、Gaussian ノイズを使用する。船鉾の計測点群からランダムに 10% の点を選択し、 $N(0, 0.1)$ の分布に従う Gaussian ノイズにより点の位置をずらすことで、ランダムノイズが含まれた点群を模した点群を生成する (Fig. 4(a))。一方、アウトライアーノイズとしては、バウンディングボックス内に一様分布する点を使用する。船鉾の計測点群からランダムに 10% の点を選択し、一様乱数を用いてバウンディングボックス内にランダムに生成した点と置き換えることによって、アウトライアーノイズが含まれた点群を生成する

(Fig. 4(d))。上記の方法で生成した、模擬ノイズを付与した2種類の点群に対して、それぞれ $L = 1, 10, 50$ で SPBR を実行し、確率的ノイズ透明化を適用した結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) (d) は $L = 1$ での結果画像であるため、一般的な不透明可視化と同等の可視化結果である。Fig. 4(a) では、ランダムノイズの模擬として Gaussian ノイズを付与したことによって、不正確な色分布が発生している。しかし、Fig. 4(b) (c) では、意図的にずらしたノイズ点が、 L を上げるにつれて透明化されていくことで、本来の色分布に近づいていくことが確認できる。一方、Fig. 4(d) では、アウトライアーノイズの模擬ノイズとして一様乱数によるノイズを付与したことによって、船鉾が全体的に見えづらくなっている。しかし、Fig. 4(e) (f) では、 L の値が大きくなつたことで、ノイズ点が透明化されていく、本来の船鉾の姿を確認できるようになっている。以上より、本検証からも、確率的ノイズ透明化が正常に機能していることが確認できる。



Fig. 3 The 3D scanned point cloud of a festival float “Fune-hoko” of the Gion Festival in Kyoto City, Japan. This point cloud has 25,427,464 points. The bounding-box size of the point cloud is $7.5 \times 3.4 \times 6.7$ in units of meters.

3.3 適用例

本節では、実際のレーザ計測において、様々な原因で発生したノイズを含む点群に対して、確率的ノイズ透明化を適用することで、その有効性を示す。

3.3.1 木々によるノイズ

レーザ計測において、木々は、高確率で計測ノイズを発生させる原因となる。計測対象に木々が含まれている場合、木の葉が風に揺られて小刻みに揺れることで、位置を誤計測してしまった結果、ランダムノイズが生じてしまう。さらに、木の葉の表面の光沢が、レーザ光を散乱させながら小刻みに揺れることで、多くのアウトライアーノイズを発生させてしまう。木々は、こうした木の葉を大量に有している上に、建造物と異なり、風などの外的要因により揺れやすい。したがって、レーザ計測において、ノイズを発生させることなく計測することは非常に困難である。歴史的な文化財、特に神社、寺院などは、周囲に木々があることが多いため、分析型可視化の実現には、木々によるノ

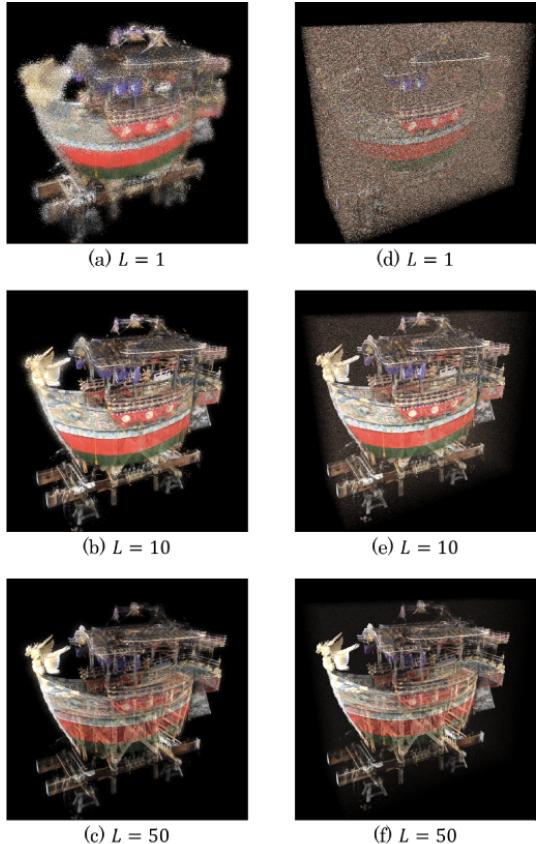


Fig. 4 Stochastic noise transparentization of the two types of simulated noise, which is random noise and outlier-type noise, for various values of L . We artificially added (a)(b)(c) Gaussian noise and (d)(e)(f) uniform noise as simulations of random noise and outlier-type noise, respectively.

イズを削減することは極めて重要である。Fig. 5に、藤森神社（京都府京都市）の計測点群を示す。Fig. 5(a)は、一般的な不透明可視化の画像である。一方、Fig. 5(b)は、 $L = 100$ でSPBRを実行して生成した画像である。Fig. 5(a)では、木々が原因で発生したランダムノイズとアウトライアが、満遍なく大量に点在している。しかし、Fig. 5(b)では、ノイズが透明化されたことで、それぞれの木をより鮮明に確認することができるようになっている。

3.3.2 粉塵によるノイズ

工場内では、作業中に発生する粉塵が空中に浮遊していることが多い。このような状況でレーザ計測をおこなうと、粉塵がレーザ光を散乱させることで、ノイズが発生してしまう。Fig. 6に、レーザ計測で取得された工場の計測点群を示す。Fig. 6(a)は、一般的な不透明可視化の画像である。一方、Fig. 6(b)は、 $L = 100$ でSPBRを実行して生成した画像である。Fig. 6(a)では、粉塵が原因によるノイズで、全体的にぼやけて見えている。しかし、Fig. 6(b)では、ノイズが透明化され、工場内の機器まではっきりと見えるようになっている。

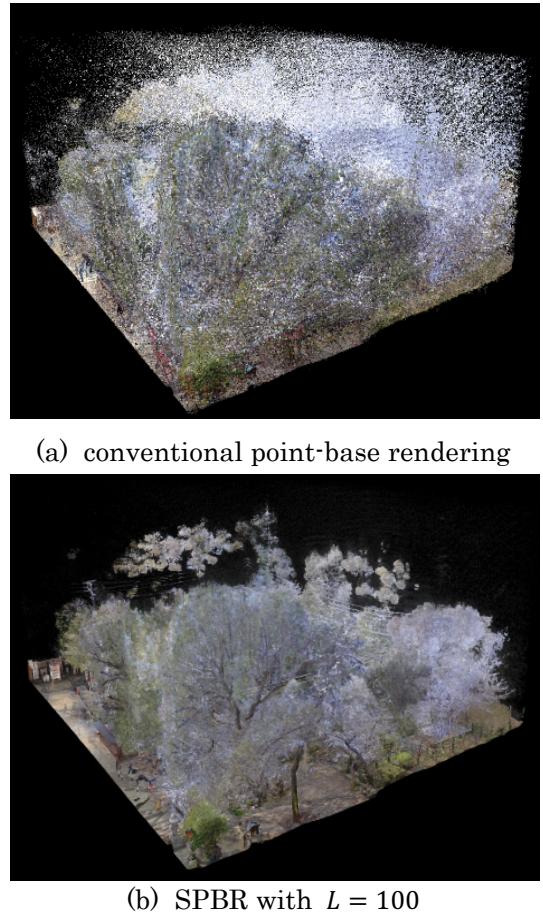
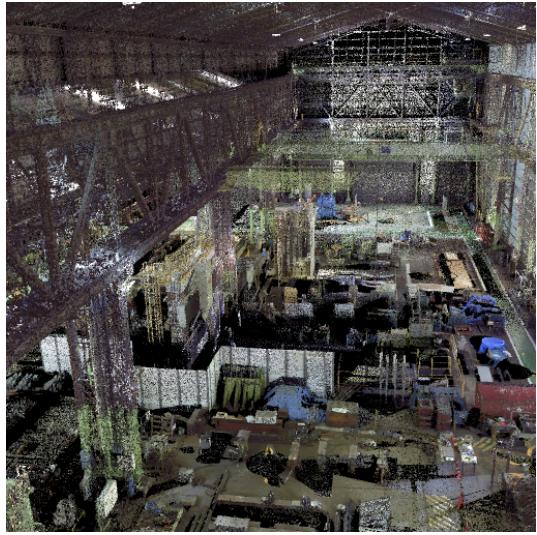


Fig. 5 Visualizations of a 3D scanned forest using (a) the conventional point-based rendering (SPBR with $L = 1$) and (b) SPBR with $L = 100$.

3.3.3 反射物体によるノイズ

現在のレーザ計測技術では、透明物体や反射物体を正確に計測することは非常に困難である。ガラスなどの、透明である上に鏡面反射する物体が計測対象に含まれている場合、レーザ光が透過したり反射することによってノイズが発生してしまう。Fig. 7に、京都女子大学（京都府京都市）のキャンパス内の計測点群を示す。Fig. 7(a)は、一般的な不透明可視化の画像である。一方、Fig. 7(b)は、 $L = 100$ でSPBRを実行して生成した画像である。Fig. 7(a)において、黄色いマーカの箇所にアウトライアが発生していることが確認できる。このアウトライアは、キャンパス内の建物に取り付けられている多くの窓ガラスが、レーザ光を反射したことによって発生したノイズだと考えられる。しかし、Fig. 7(b)では、ノイズが透明化され、見えなくなっていることがわかる。また、中央右側の植木や校舎の箇所を見ると、Fig. 7(a)では、ランダムノイズによって物体の境界がぼやけていたのが、Fig. 7(b)では、ノイズが透明化されたことで輪郭がはっきりし、より高精細になっていることも確認できる。



(a) conventional point-based rendering

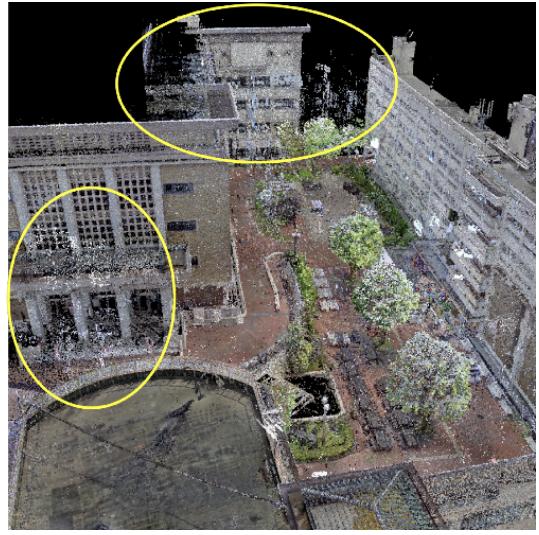


(b) SPBR with $L = 100$

Fig. 6 Visualizations of a 3D scanned scene of a factory using (a) the conventional point-based rendering (SPBR with $L = 1$) and (b) SPBR with $L = 100$.

4. 輝度調整

本章では、確率的ノイズ透明化によって視認性が低下した画像を対象として、視認性を向上させることを目的とした、輝度調整の手法を提案する。前章の冒頭で説明したように、確率的ノイズ透明化は、 L を上げてアンサンブル数を増やすことで、ノイズ透明化効果を強めることができる。 L を上げるということは、各アンサンブル点群の点数が減少することである。各アンサンブル点群の点数が減少すると、各中間画像において、可視化対象の点の色が投影されるピクセル数が減少するため、最終的に得られる半透明画像の不透明度が低下する。したがつ



(a) conventional point-based rendering



(b) SPBR with $L = 100$

Fig. 7 Visualizations of a 3D scanned campus building with many glass windows by using (a) the conventional point-based rendering (SPBR with $L = 1$) and (b) SPBR with $L = 100$. yellow circle shows outlier-type noise and red circle shows random noise. The laser-scanned data include the outlier-type noise in the area indicated by the yellow circle in (a), but the noise disappears in (b).

て、ノイズ透明化効果を強めるために L を上げすぎた場合、最終的に得られる半透明画像が暗くなるため、視認性の低下につながる。そこで本研究では、SPBR の後処理として、視認性が低下した画像の輝度値を增幅させることで、画像の明るさを自動で調整することで考える。また、自動輝度調整を実行するにあたり、調整の指標が必要となるが、提案手法では、可視化対象の本来の明るさを有している $L = 1$ の画像を調整の指標とする。

4.1 アルゴリズム

提案する輝度調整の手法は、以下の 5 つのステップから構成される：

ステップ 1（元画像生成）：任意のリピートレベル L で SPBR を実行し、画像を生成する。この画像を「元画像」と呼ぶ。

ステップ 2（参照画像生成）： $L = 1$ で SPBR を実行し、画像を生成する。この画像を「参照画像」と呼ぶ。このとき、リピートレベル以外のパラメータは、元画像を生成した際と同じ値に設定する。

ステップ 3（閾値輝度値探索）：参照画像をグレースケール化する。このグレースケール画像において、最大輝度値 B_{\max} を求める。さらに、その輝度値以上のピクセル数の割合が、全ピクセルの 1%以上となる閾値輝度値 B_{th} を求める。このとき、背景色のピクセルは、割合の計算から除外する。

ステップ 4（增幅倍率決定）：元画像の各ピクセルの RGB 各輝度値に乘じて画像の輝度を明るくする增幅倍率 p を、以下のアルゴリズムで決定する。まず、初期値 $p = 1.0$ 、 $\Delta p = 0.01$ とし、以下の式 (2) で p を更新する：

$$p \leftarrow p + \Delta p. \quad (2)$$

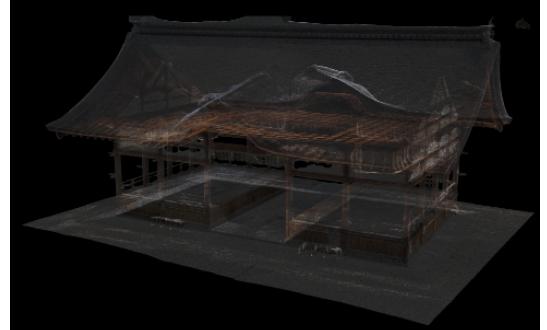
各更新ごとに、元画像の各ピクセルの RGB 各輝度値を p 倍し、グレースケール化する。このグレースケール画像において、閾値輝度値 B_{th} 以上のピクセルの割合を計算する。この割合が、全体の 1%以上となったところで更新を打ち切り、そのときの p の値を增幅倍率とする。

ステップ 5（輝度増幅）：ステップ 4 で決定した增幅倍率 p を、元画像の各ピクセルの RGB 各輝度値に乘じて、輝度値を増幅した半透明画像を得る。

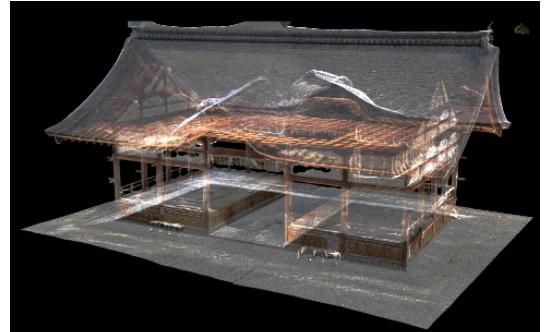
ノイズ透明化によって視認性が低下した画像に対して、以上の 5 つのステップを実行することで、高視認性を満たす画像を自動で生成することができる。

4.2 適用例

提案する輝度調整を適用した例を Fig. 8 に示す。Fig. 8(a) は、藤森神社一拝殿（京都府京都市）の計測点群に対して、 $L = 100$ で SPBR を実行して生成した画像である。一方、Fig. 8(b) は、Fig. 8(a) に対して、提案する輝度調整を適用して生成した画像である。Fig. 8(a) では、画像が全体的に暗く、拝殿の内部構造を把握することができない。しかし、Fig. 8(b) では、全体的に画像が明るくなったことで、拝殿の内部まで鮮明に確認することができる。Fig. 8(b) の画像を生成した際の增幅倍率 p は 2.52 であり、この増幅倍率 p を探すのに要した時間は 1.48 秒であった。



(a) original image before the brightness amplification (SPBR with $L = 100$)



(b) obtained image after the brightness amplification ($p = 2.52$)

Fig. 8 Comparison of the images before and after the brightness amplification. Visualizations of a 3D scanned the worship hall of Fujinomori Shinto Shrine by using SPBR with $L = 100$. This point cloud has 16,022,059 points. The automatically determined value of p is 2.52. It took 1.48 seconds to find this value of p .

5. 結論

本研究では、SPBR が潜在的に有している確率的ノイズ透明化の効果を有効利用することで、ノイズに対してロバストな透視可視化を実現できることを示した。さらに、ノイズを透明化したことで視認性が低下した画像に対して、画像の輝度を増幅して明るくすることで、自動で視認性を向上させる輝度調整の手法を提案した。以上の 2 点を組み合わせることで、ノイズに対してロバストであり、かつ高視認性を満たす透視可視化手法を実現した。大規模 3 次元計測点群には、ノイズが含まれていることがほとんどであるため、ノイズを自動で透明化することができる高精細可視化は、分析型可視化の実現のためには非常に有用である。

今後の展望としては、確率的ノイズ透明化の理論的分析と検証実験が考えられる。本論文では、主に、様々なノイズが含まれた実際の計測点群に対して、確率的ノイズ透明化を適用することで、その効果を実証した。今後は、こ

の効果を理論的に実証するために、各中間画像の各ピクセルを参照することで、さらなる検証を進めていく。一方、輝度調整に関しては、画像の輝度値分布が悪いと、提案手法を適用したとしても、期待するような効果を得ることができない場合がある。したがって、画像の輝度値分布に柔軟な輝度調整手法の確立が必要である。

謝辞

計測データの取得にご協力いただいた（株）シュルード設計、藤森神社、公益財団法人・祇園祭船鉢保存会、京都女子大学の北尾靖雅教授、に感謝いたします。

参考文献

- 1) Zorich, Diane M.: A Survey of Digital Cultural Heritage Initiatives and Their Sustainability Concerns. Managing Economic Challenges. Council on Library and Information Resources, 1755 Massachusetts Ave., NW, Suite 500, Washington, DC 20036, 2003.
- 2) Parry, Ross.: Digital heritage and the rise of theory in museum computing. Museum management and Curatorship Vol. 20, No. 4 (2005) pp. 333–348.
- 3) 八村広三郎, 田中弘美, 田中覚ら: 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) J. Shan, C.K. Toth, editors: Topographic Laser Ranging and Scanning, Principles and Processing, CRC Press, 2008.
- 5) G. Heritage, A. Large, editors: Laser Scanning for the Environmental Sciences, Wiley-Blackwell, 2009.
- 6) 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, 73–80, doi:10.5194/isprs-annals-III-5-73-2016, July, 2016.
- 7) 田中 覚, 長谷川 恭子, 徐 睿, 岡本 篤志: 確率的レンダリングに基づく大規模ポイントクラウドの高精細半透明可視化, 日本シミュレーション学会, Vol. 34, No. 2, pp. 130–135, 2015.
- 8) Satoshi Tanaka, Makoto Uemura, Kyoko Hasegawa, Takehiko Kitagawa, Takahiro Yoshida, Asuka Sugiyama, Hiromi T. Tanaka, Atsushi Okamoto, Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada: Application of Stochastic Point-based Rendering to Transparent Visualization of Large-scale Laser-scanned Data of 3D Cultural Assets, Proc. IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis) 2014, pp. 267–271, 2014.