

密な点群からの平面抽出を利用した インタラクティブなモデリングシステム

藤井 智 増田 宏

東京大学大学院

An Interactive 3D Modeling System Based on Dense Point-Cloud

Satoshi Fujii Hiroshi Masuda

The University of Tokyo

satosi.fujii@gmail.com

masuda@sys.t.u-tokyo.ac.jp

アブストラクト

本稿では、密な点群とレーザ反射強度画像を用いて、インタラクティブに 3D モデルを作成する方法について述べる。近年、レーザ計測装置が急速に進歩し、広範囲の計測対象から数千万点規模の点群を短時間で取得できるようになってきた。そのような点群は非常に密であるため、投影面に写像すると高精細な画像を得ることができる。一方で、建物のような比較大規模な対象物においては計測場所が限定されるため、裏側が計測できないなど、完全な 3D モデルを得ることが難しい。また、点群から曲面データを得るためにはクラスタリングなどが必要で、面倒な処理が必要であった。本研究では、密な点群から生成されたメッシュを画像と関係付け、画像に基づいたインタラクティブな処理によって、3D サーフェスモデルを作成する方法について提案する。また、インタラクティブな操作に必要な 3D 情報を得るために、数千万点規模のメッシュデータを動的にメモリ読み込みするための手法についても示す。

1. はじめに

現実のシーンから 3D モデルを作成したり、逆に、現実のシーンの中に仮想オブジェクトを作成したりする問題を考える。本稿ではこの問題に対して、密な点群とレーザ反射強度画像を用いて、インタラクティブに 3D モデルを作成する方法を提案する。

近年、レーザ計測装置が急速に進歩し、広範囲の計測対象から数千万点規模の点群を短時間で取得できるようになってきた。比較的大規模な対象物を計測するためのレーザスキャナとして、ロングレンジの飛行伝播時間計測方式 (time-of-flight) とミッドレンジの位相差方式 (phase-based) のレーザスキャナが知られている。前者は、数百 m の距離でも計測できる反面、高密度の点群を得るためには長時間の計測が必要になる。位相差方式のレーザスキャナでは、機種にもよるが、飛行伝播時間計測方式の 10 倍以上の速度で計測でき、最大で 50~100m の中距離を計測することができる。この方式のレーザスキャナは非常に高速で、毎秒 50 万点から 100 万点程度の計測ができるため、5000 万個程度の点群であれば、計測が 3~4 分で終了する。計測装置はまだかなり大きいものの、計測作業は非常に簡単であり、多くのシーンの 3 次元情報を容易に得ることができる。

中・長距離のレーザスキャナでは、レーザを対象物に照射してから、反射波が帰ってくるまでの時間によって距離を計測する。そのため、レーザの反射強度も同時に測定される。反射強

度は、白い物体では大きくなり、黒い物体では小さくなるため、反射強度を正規化することで明暗画像を得ることができる。また、最近のスキャナではデジタルカメラのカラー画像と点群を関連付けた RGB 値のついた点群を取得できるものもある。

位相差方式のレーザスキャナで取得した点群は非常に密であるため、点群から高精細の白黒またはカラーデジタル画像を作成することができる。したがって、画像と点群を関連付けることが可能であるが、こうした研究はあまり多くない。Xu ら[1]は、点群データを用いて非写實的レンダリングを行った。また、同じ研究グループは、画像をインタフェースとして用いて、点群のセグメンテーションを行った[2]。しかし、3D モデリングを直接行うものではない。メッシュベースのモデリングシステムについては、スケッチベースの手法が多く報告されている[3][4]。また、ステレオ画像を用いたスケッチベースシステムについても研究がなされている[5]。本研究の特徴は、これらのスケッチベースの手法とは異なり、ユーザとのインタフェースとして画像を用い、また必要に応じて画像を介して点群データにアクセスすることで、スケッチ情報と点群情報を共に利用したサーフェスのモデリングを行うことにある。

以下、2 章でモデリングの概要について述べ、3 章で手法の詳細を述べる。4 章で例題を示し、5 章でまとめを示す。

2. モデリングの概要

2.1 画像の生成

位相差方式のレーザスキャナでは、角度 θ, ϕ を制御してレーザの照射方向を決め、対象物までの距離を計測する(図1)。したがって、座標は照射方向(θ, ϕ)における距離として得られるので、すべての点群は単位球面上の一点に写像できる。

計測点を球面座標 (r, θ, ϕ) で記述すると、図2(b)のように θ, ϕ 平面上に展開できる。ここではこの画像を球面画像と呼ぶ。なお、この例題はモスク内部を計測したもので、約2600万点から構成されている。

この図からわかるように、点群を球面画像に写像すると、直線が直線に写像されない。このことは、画像上でのスケッチを考えると都合が悪い。そこで、直線が保存するように、球面画像を透視投影画像に変換する。ユーザが球面画像上で注視点と矩形領域を指定すると、図3(a)に示すようにスクリーンが生成される。球面画像上の各画素をこのスクリーン上に投影することによって図3(b)に示すような透視投影画像を作成する。透視投影画像上では、3次元空間での直線が直線に写像されている。

ここで、球面画像と透視投影画像、3次元オブジェクトの関係を図4に示す。投影中心はレーザ光が照射された計測原点である。

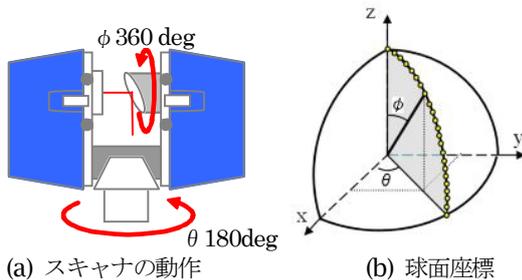


図1. レーザ計測装置と球面座標.



(a) 計測された点群 (建物を上から見た図)



(b) θ を横軸、 ϕ を縦軸でプロットした画像 (球面画像)

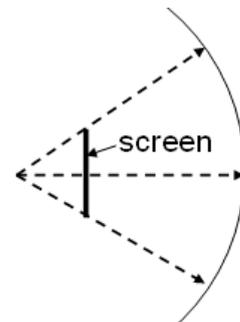
図2. 計測点群と球面画像.

この図からわかるように、透視投影上の点と球面画像上の点は一対一対応である。また、画像上の点が決まると、レーザの照射方向が決まり、もしその方向の計測点がある平面上に乗っていることがわかっているならば、3次元座標を一意に決めることができる。

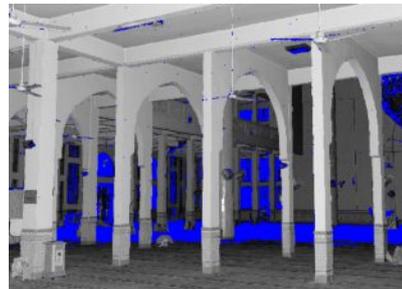
2.2 モデルの生成

ユーザが透視投影画像の一部を矩形によって選択すると、領域成長法を用いて平面領域を計算する。図5(a)の矩形はユーザが選択した領域を示している。また、この図には同じ平面上にあると判定された領域も示されている。検出された領域の点群データに基づいて平面の方程式が決定され、その平面が基準面として使われる。

次に、図5(b)に示すように、ユーザが基準面上に図形を描く。この際、直角モードを選択すると、角が直角になるように点列が調整される。直角モードはキーボードによって切り替えができる。ユーザが描いた図形の2次元座標は、図4の仕組みを用



(a) 球面画像上の点の透視投影



(b) 透視投影画像

図3. 透視投影画像の作成.

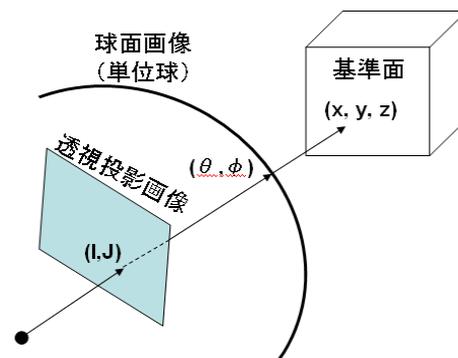
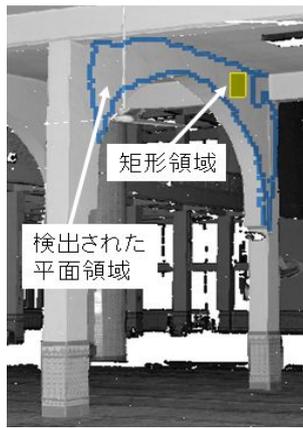
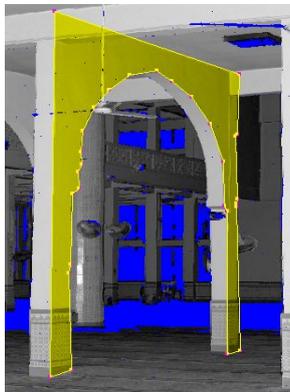


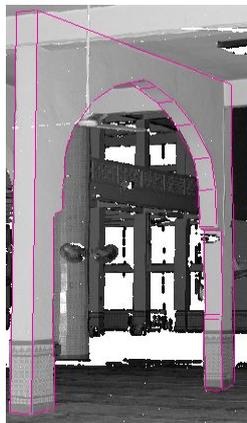
図4. 球面画像・透視投影画像・3Dオブジェクトの関係.



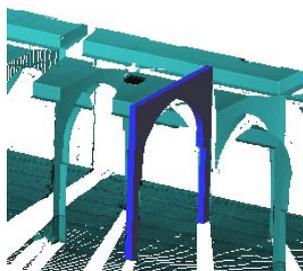
(a) 基準面の抽出



(b) 基準面上でのスケッチ



(c) 立体の作成



(d) 点群と立体の表示

図5. 現物のオブジェクトのモデリング.

いて基準面に投影され、3次元の点列に変換される。

閉じた図形ができると、次に奥行き方向にマウスを動かすことによって、スワイプ距離が決定されて立体形状が生成される。図5(c)(d)に、画像上のエッジをなぞることによって生成された3Dモデルを示す。

また、ユーザは基準面上に任意の図形を描くことができる。図6は、現実のシーンとは一部の形状が異なるアーチを描いた例である。さらに、ユーザが描画する面は、基準面に垂直に選ぶこともできる。図7(a)は、椅子の座面を基準面として選び、基準面に垂直にH型の図形を描いた例である。図7(b)は、生成された3Dモデルを点群データと共に表示したものである。

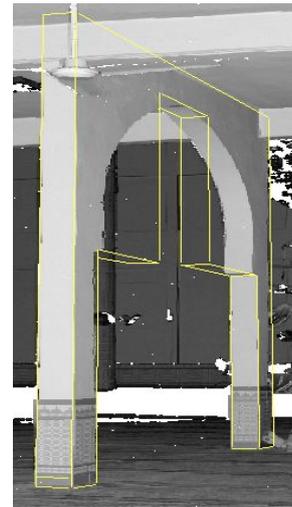
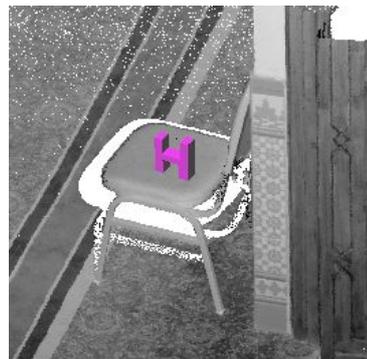


図6. 基準面上での異なる形状の描画

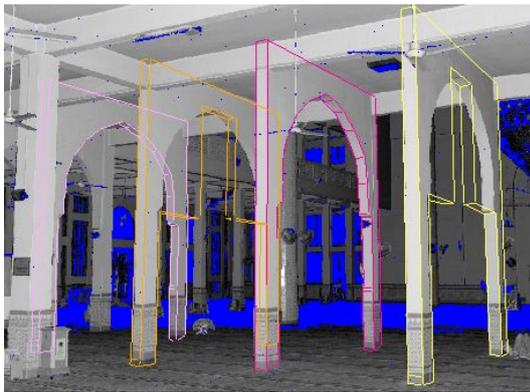


(a) 垂直面上での立体生成



(b) 点群と立体の表示

図7. 基準面と垂直な面上での形状モデリング



(a) 立体のコピーと平行移動



(b) 立体の3D表示

図8. 立体のコピーと平行移動.

ユーザが作成した立体は、画像上でコピー、平行移動、回転移動ができる。図8(a)(b)は、2種類のアーチをコピーして配置した例である。

3. 手法の詳細

3.1 画像の生成

通常、計測装置から出力される汎用フォーマットは、 (X, Y, Z, I) であり、 I はレーザ反射強度である。 I のレンジは機種依存であるが、 $[0, 255]$ で正規化すると明暗画像を得ることができる。また、直交座標 (x, y, z) と球面座標 (θ, ϕ, r) の関係は以下の式：

$$\begin{aligned} x &= r \cos \theta \sin(-\phi) \\ y &= r \sin \theta \sin(-\phi) \\ z &= r \cos \phi \end{aligned}$$

で表されるので、この式から θ, ϕ を計算して球面画像を作成することができる。なお、レーザスキャナから出力される (x, y, z) の計算には機種に依存した補正が行われているので、上の式から逆算された θ, ϕ は厳密にはレーザ照射角度ではないが、微小なずれなので本研究においては無視しても問題は生じない。

計測された点群を θ, ϕ 平面上にプロットすると、計測装置の

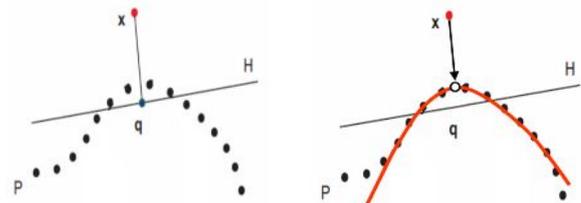
性質から、点群は ϕ 軸、 θ 軸に沿ってほぼ等間隔で整列する。また、3次元空間で近傍の点は θ, ϕ 平面上でも近傍点となるため、近傍探索は θ, ϕ 平面上で行うことができる。

3.1 平滑化

位相差方式のレーザスキャナは、大量の点群が短時間で取得できる反面、3~6mm程度の比較的大きい誤差と大量の異常値を含む。そこで、基準面を算出するためには平滑化が必要である。ここでは、点群の平滑化は Moving Least-Squares Projection (MLS) [6] に基づくが、異常値に対するロバスト性を高めるために、ロバスト推定を用いた方法[7]を用いる。

MLSを用いた平滑化では、以下の手順によって平滑化を行う。

- (1)ある点 \mathbf{x} を補正するために、近傍点 $(i=1, \dots, N)$ を得る。
- (2)図9(a)に示すように、近傍点の近似平面 H を算出する。
- (3)近傍点を平面 H 上に投影する。また、点 \mathbf{x} の投影点 \mathbf{q} を基準点とする。
- (4)近傍点を平面 H 上のハイトフィールドと見做し、2次多項式曲面で近似する。2次多項式曲面は、基準点 \mathbf{q} からの距離によって減衰する重み関数を用いて、残差の重みつき2乗和を最小化して算出する。
- (5)元の点 \mathbf{x} を2次曲面上に投影することで、平滑化を行う。



(a) 平面 H

(b) 2次曲面上への投影

図9. MLS Projection.

ただし、Levin らの方法[6]は、点群に異常値が多く含まれると、結果が大きくなる。このことは三角測量方式の点群計測装置ではそれほど深刻ではないが、位相差方式の点群計測装置は大量の異常値が混入することが避けられないので、既存手法をそのまま適用しても十分な平滑化は行えない[7]。そこで本研究では、最小2乗法の代わりに、Tukey のバイウエイトに基づく曲面推定によって2次曲面を計算した。Tukey のバイウエイトは、ロバスト推定のための手法で、重み関数：

$$w_i(r) = \begin{cases} r(1-r^2/c^2)^2 & |r| < c \\ 0 & |r| > c \end{cases}$$

を用いて、以下の計算を行う。ここでは、 $c=6$ を用い、残差が 6σ を超える点を除外した。

$$\sum_{i=0}^N \left(w_i(r_i) \frac{\partial S}{\partial a_k}(p_i) \cdot \frac{\chi(|p_i - q|)}{\sigma} \right) = 0$$

3.2 メッシュ生成とアクセス

点群は θ ϕ 平面上に写像でき、また、点群はこの平面上に比較的整列して保存されている。そのような点群に対しては、ストリーミング型のドロネー分割[8]を用いて高速にメッシュモデルに変換できる。

ただし、大規模点群から生成されるメッシュの処理には多くのメモリを必要とし、また、読み込みにも非常に時間がかかる。そこで、本研究ではメッシュはハードディスク上に保持しておく、必要な部分のメッシュだけを逐次メモリ上に展開することを考える。

本研究では、点群データが θ ϕ 平面上に展開できることを利用して、図2(b)の矩形領域を図10のようにセルと呼ばれる格子に分割する。メッシュの頂点は、セルの単位でハードディスクに格納し、頂点間の隣接関係を示すポインタは、セル番号とセル内での頂点番号によって記述しておく。また、アクセスを高速化するために、各セルのハードディスク上での先頭アドレスとバイト数を保持したテーブルを作成して、メモリ上に保持しておく。なお、本研究では、縦100、横200の計20000個のセルに分割して頂点を保存した。

近傍頂点を探索する際は、データを動的にメモリ上に展開する。これにより、省メモリに処理可能であることに加え、HDD内のファイル先頭よりオフセットされたデータを読み込んで処理するため、ランダムアクセスに比べ著しく短時間でファイルIOが可能となる。以下にこの方法を用いた平面抽出法を示す。

3.3 平面の抽出

本研究では、基準面を生成するために、領域成長法を用いる。領域成長法は以下の手順で行う。

- (1) 図5(a)に示すように、ユーザは透視投影画像上で矩形領域を選択する。
- (2) それにより、対応する球面画像上の画素が計算され、対応するメッシュモデルのセルが読み込まれる。
- (3) メッシュモデルから、図5(a)の矩形内に含まれる頂点を選択され、その頂点をシード領域とする。
- (4) シード領域の頂点に対して近似平面を計算する。
- (5) メッシュモデルの隣接する頂点群を調べ、平面に乗っていたらそれらの頂点を平面領域として追加し、平面の方程式を更新する。もし、隣接頂点がまだメモリに展開されていないならば、その頂点を含むセルをハードディスクから読み込む。
- (6) 以上の操作を繰り返すことで、図5(a)に示すような平面領域を抽出する。

この処理では、平面領域の探索に必要なセルのみをロードするため、少ないメモリで大容量のメッシュモデルを扱うことができる。なお、平面領域が広大であらかじめ指定した頂点数を越えたときには処理を打ち切って平面式を出力する。

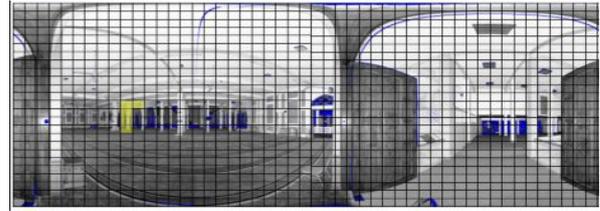


図10. 分割されたメッシュモデル。

3.4 スケッチと立体生成

ユーザはまず基準面を選択した後、透視投影画像上で図形を描く。その際、図4に示すように、画像上の点が3次元座標に変換される。閉じた図形が指定されると、基準面に垂直方向へのスイープ距離がマウスの位置によって決められ、カーソルの動きに追従して、リアルタイムにスイープ形状が画面に表示される。

ただし、ユーザは傾いた面上で図形を描くため、直角を描きにくい。そこで、図11(a)のように、直角性を保ちながら頂点位置を移動させる仕組みも用意した。この例では、ユーザがAの位置を決めるためにマウスをドラッグすると、直角を保つために点Bの位置が自動的に移動する。直角を保つかどうかを指定するモードは、キーボード操作によって簡単に切り替えることができる。

3.5 立体のコピーと移動

立体の平行移動と回転移動もマウス操作に追従して行うことができる。いずれも移動する立体と基準面を指定することで透視投影画像上でのマウス操作を3次元空間での操作に置き換えることができる。

平行移動においては、まず基準面を選択し、その平面上で立体を平行移動する。移動は、基準面上での移動ベクトルを計算

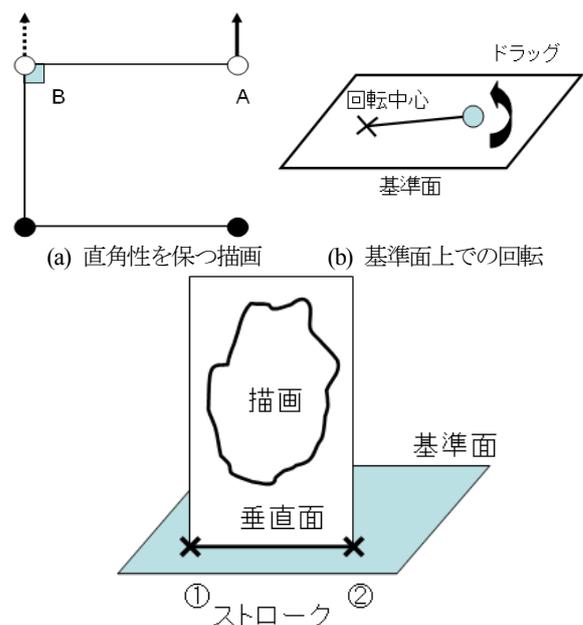


図11. 描画インタフェース。

し、立体を移動させる。図8は、立体をコピーした後、アーチの上面を基準面として、画像上の位置と一致するように画像上で移動した例である。

図11(b)は、回転操作を示している。基準面が指定された後の最初のクリックによって回転中心が基準面上に決められ、次にマウス位置から回転角度が計算されて、3Dモデルがリアルタイムに回転する。

図11(c)は、基準面に垂直な面に描画する方法を示している。2回のクリックによって基準面上の2点が算出され、2点を通り基準面に垂直な面が算出される。ユーザが透視投影画像上で描画を行うと、点列がこの垂直面上に投影されて3次元座標に変換される。

4. 例題

図12(b)に図1, 2で示した点群に対して、本手法を適用し、3Dモデルを作成した例を示す。図12(a)は、透視投影画像の広角表示である。図12(c)は、点群と重ね合わせた図である。この例で示すように、本手法は写真をなぞることで簡単に立体のモデリングができ、また実物との一致を確認しながら作業を行うことができる。

5. まとめ

本稿では、点群と透視投影画像を用いて、インタラクティブにモデリングする手法を示した。これまで一般的なPCでは困難であった大規模点群データの処理を、out-of-coreなメッシュ処理手法を用いることで実現した。また、点群モデリングは比較的作業量が多いことが問題であったが、本手法では点群処理とイメージベースモデリングを組み合わせることによって、簡単な処理で3Dモデリングを行う環境を実現した。本手法では、写真をなぞるだけで形状作成ができるので、短時間の単純な作業で現物のモデリングが可能である。

ただし、現状では、本手法で扱える形状は立上げ方向が底面に垂直であるスイープ形状だけである。現実の多様なオブジェクトをモデリングするためには、扱える対象を増やしていく必要がある。また、透視投影画像では広い範囲が表示できないために、長い梁などのモデリングが行いにくいという問題もある。今後、システムを拡張していきたい。

なお、今回用いたサンプルデータを提供頂いたファローージャパン株式会社に謝意を表す。

参考文献

[1] H. Xu, N. Gossett, B. Chen, PointWorks: Abstraction and Rendering of Sparsely Scanned Outdoor Environments, Proc. of the 2004 Eurographics Symposium on Rendering, pp. 45-52, 2004
[2] X. Yuan, H. Xu, M. Nguyen, A. Shesh, B. Chen, Sketch-Based Segmentation of Scanned Outdoor Environment Models, Proc. of the 2nd Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and

Modeling, pp.19-26, 2005

[3] R.C. Zeleznik, K.P. Herndon, J.F. Hughes. SKETCH: An interface for sketching 3D scenes. SIGGRAPH 96, pages 163-170, 1996.

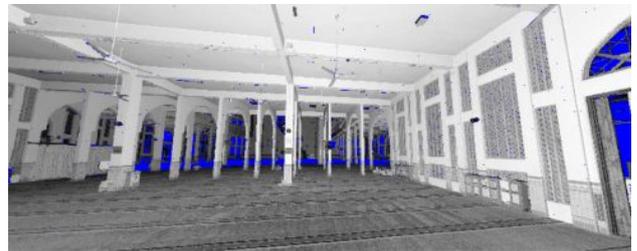
[4] T. Igarashi, S. Matsuoka, H. Tanaka. Teddy: A sketching interface for 3D freeform design. SIGGRAPH 99, p. 409-416, 1999.

[5] P. Debevec, C. Taylor and J. Malik. Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A Hybrid Geometry- and Image-Based Approach, SIGGRAPH 96, pp.11-20, 1996.

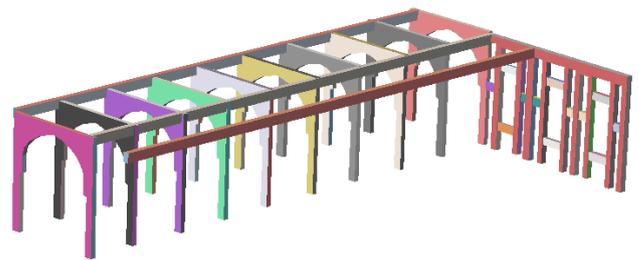
[6] D. Levin.: Mesh-Independent Surface Interpolation, Geometric Modeling for Scientific Visualization (2003) 37.

[7] H. Masuda, I. Tanaka: Extraction of Surface Primitives from Noisy Large-Scale Point-Clouds, CAD&A, 6(3), 2009.

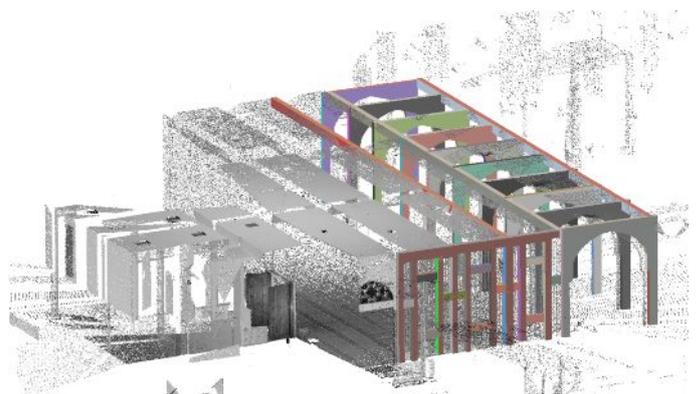
[8] M. Isenburg, Y. Liu, J. Shewchuk, J. Snoeyink: Streaming Computation of Delaunay Triangulations, SIGGRAPH 06, 1064, 2006



(a) モデリング対象の画像



(b) モデリングした立体



(c) 立体と点群の表示

図12. 現物のモデリングの例.