

点群と画像を用いたプラント設備の3D モデリング

3D Modeling of Plant Facilities based on Point-Clouds and Images

増田宏†, ○松岡諒‡

Hiroshi MASUDA and Ryo MATSUOKA

†: 東京大学大学院 システム創成学専攻, masuda@sys.t.u-tokyo.ac.jp

‡: 東京大学大学院 システム創成学専攻, matsuoka@nakl.t.u-tokyo.ac.jp

概要: 本研究では, レーザスキャナで取得された高密度の点群を用いた, プラント設備の 3D モデリングについて述べる. 近年のレーザスキャナは高解像度であるため, 各点でのレーザ反射強度を用いてデジタル画像が生成できる. 本研究では, 画像と点群を組み合わせ, 幾何計算は点群を用いて行い, ユーザとのインタラクションは画像によって行うモデリング方法を考える. 我々の方法では, 点群データから自動抽出された曲面要素がデジタル画像上に表示され, ユーザは画像上で曲面の編集や接合を指示することでモデリングを行う.

<キーワード> レーザスキャナ, 形状モデリング, 点群処理

1. はじめに

近年の測量用のレーザスキャナは, 短時間で高密度の点群データが得られるようになってきている. レーザスキャナは, レーザ光を照射し, 反射光が戻るまでの時間を計測することで, 対象物までの距離を計測する. 照射方向は機械的に制御されているので, 結果として, 光源を原点とした 3 次元座標を得ることが出来る. 50~100m 程度の中距離を計測できるレーザスキャナには, 飛行伝播時間計測方式 (time-of-flight) または位相差方式 (phase-based) が用いられている. どちらもレーザの反射光が戻るまでの時間を計測するが, 飛行伝播時間計測方式ではレーザパルスごとに計測を行うのに対して, 位相差方式では, 変調したレーザ光を連続的に照射し, 反射波の位相差を利用して距離を計算するので高速である. ただし, 最近のレーザスキャナでは, どちらの方式でも, 毎秒 100 万点程度の計測が行えるものが出てきている.

高性能なレーザスキャナを利用すると, 全方位で 5000 万点程度の点群が1分程度で取得でき, デジタル画像と同等の解像度を持った点群データを得ることができる. レーザスキャナによって取得された点群は, 反射強度値を持つ. 反射強度の値は, 明るい色の物体では大きく, 暗い色の物体では小さくなるため, この値を [0,255] の範囲に置き換えると, 明暗画像を生成するこ

とができる. また, 点群計測の際にデジタルカメラでカラー画像を取得し, 点群とカラー画像を対応付けることによって, 点群に色を付けることも可能である.

本研究では, こうした高密度の点群を用いて, プラント設備の3D モデリングを行うことを考える. 我々は既にプラント設備のモデリングを行うシステム[1]を開発しているが, その方法では, ユーザが個々の部材を逐一指定してモデリングする必要があった. 我々は, 曲面抽出のプロセスを自動化することで, 工数を削減できる手法を開発したので, 本稿ではそれについて示す.

2. プラント設備の3D モデリング

プラント設備では, 長期間に渡って保守を行う必要があるため, 改修作業などのために, 現況を忠実に再現した 3D モデルによる作業検討のニーズが強い. プラントエンジニアリングでは 3D CAD の利用率がまだそれほど高くないのに加えて, 改修を必要とするプラントは CAD が普及する以前に作られたものが多い. また, 度重なる改修のために, 信頼できる図面すらない場合も少なくない. こうした事情から, レーザスキャナを利用したプラント設備の現況の 3D モデリングが注目されている.

プラント設備は, 配管や鋼材などによって構成されているので, それらの構成要素を3次元モデルとして再構成することが要求される. しかしながら, プラント設備

の計測では、レーザスキャナを設置する足場が確保できないなどの理由で、計測地点が限定されることが多い。そのため、部材の裏側が計測できなかつたり、他の部材に隠されたりする箇所において、計測点の欠落が起こる。

従って、設備のモデリングでは不完全な点群を前提にした形状生成が求められる。プラント設備を計測した点群においては、図1のように、複雑に分断された点群の断片の集合となる。そのため、作業者が元の形状を推定するには、別にとった写真を参照したり、現場に精通した技術者の支援を受けたりすることが必要となる。

我々は、この問題に対処するために、画像と点群を組み合わせた3Dモデリング手法を提案してきた[1]。既に述べたように、最近のスキャナはデジタル画像と同等レベルの解像度を持っている。そのため、点群からデジタル画像を合成し、個々の画素に3次元座標を関連付けることが可能である。図2は、図1に相当する点群データからレーザ反射強度を用いて生成したデジタル画像である。

図3に我々の試作したモデリングシステムを示す。このシステムでは、フォトグラメトリによるモデリングのように、ユーザが画像上で対象物のフィーチャを指定し、それに基づいて配管などの3D形状を復元する。古典的なフォトグラメトリでは、ステレオ画像上でユーザが線分や点を描いて3Dデータを再構成するのに対して、我々のシステムでは、各画素が3D座標を持っているので、単一の画像から3D形状を復元することができる。

曲面領域を抽出するためには、領域成長法がよく用いられる。この方法では、図4に示すように、最初にシード領域が指定されて曲面の初期値が計算され、次にその領域を拡大していくことで曲面領域を同定する。

その際、シード領域を適切に指定することは非常に重要である。たとえば配管では、数cmから1mを超えるものまで様々な径のものが存在する。点の誤差が数mmであり、曲面の曲率も多様であるため、適切な範囲がシード領域として指定されていないと、円柱の初期値が正しく計算できず、適切な曲面領域を計算することができないという問題がある。

一方、曲面計算では、シード領域を使わないRANSAC法もよく知られている。しかし、大規模な点群においては、RANSAC法は計算コストが非常に高いという問題が存在する。そこで本研究においては、実用

的な計算時間で曲面領域を自動検出する方法を考えて、それに基づいて点群と画像を連携させたプラント設備のモデリング手法を考える。

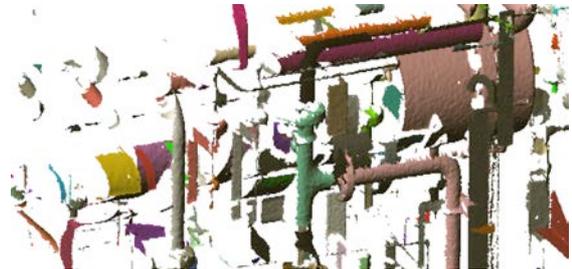


図1 断片に分かれた点群データ



図2 点群データから生成された画像

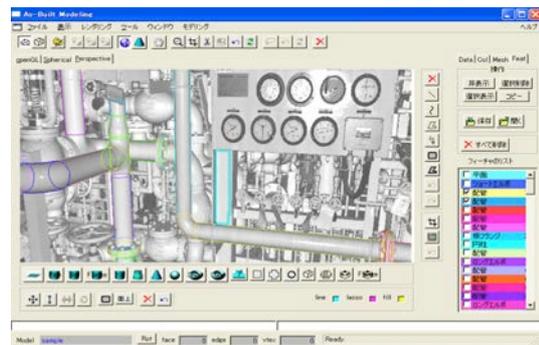


図3 点群と画像を用いた3Dモデリング

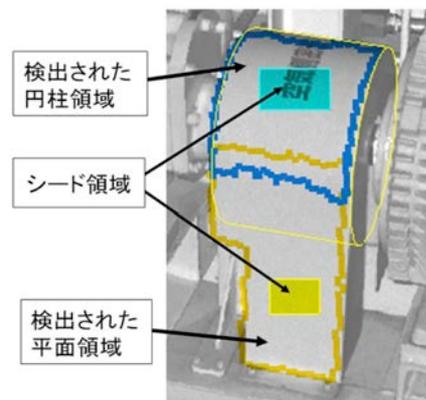


図4 シード領域と領域成長法

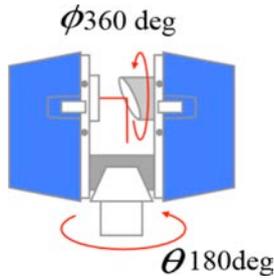


図5 レーザの照射方向

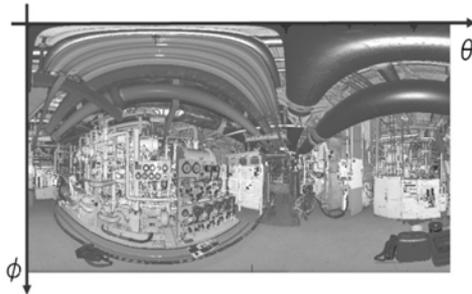


図6 メルカトル画像

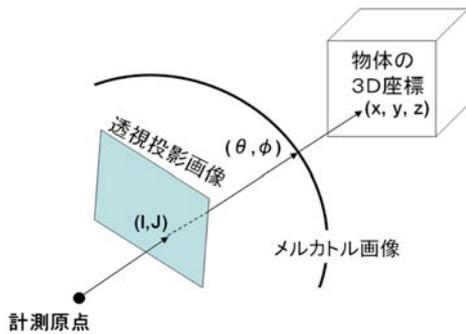
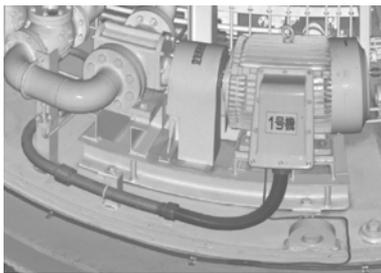
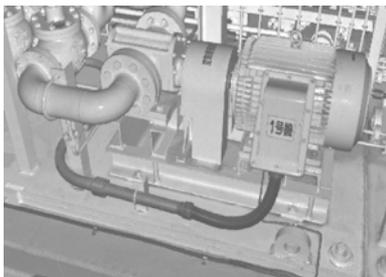


図7 透視投影画像への変換



(a) メルカトル画像



(b) 透視投影画像

図8 透視投影画像への変換

3. 点群からの画像の生成

レーザスキャナで計測された点群の座標は、計測装置を原点とした座標系で記述される。図5にレーザスキャナのレーザ照射方向を制御する仕組みを示す。レーザ計測においては、図に示すように、 ϕ 方向に360度回転させて点群を取得した後、 θ 方向に微小角度回転させていく。

この計測方式では、点は $\theta-\phi$ 平面に規則正しく並ぶはずであるが、実際には計測装置ごとの補正が入るため、各点の θ と ϕ は完全には等間隔にはならず、画素の位置と3D空間を双方向で対応付けることができない。

そこで座標を、 $(r \cos \theta \sin \phi, r \sin \theta \sin \phi, r \cos \phi)$ を満たす球面座標 (θ, ϕ, r) に変換し、各点を (θ, ϕ) 平面に写像することでデジタル画像を生成する。図6は、そのようにして得られた画像である。この画像をメルカトル画像と呼ぶ。なお、対応付けのない画素は周辺の画素から補間して色を決める。

メルカトル図法は極に近づくほど大きく歪み、また、直線が直線に写像されない。このため、ユーザが画像上にスケッチする目的には適していない。そこで、図7のように、メルカトル画像から透視投影画像を合成する。透視投影では大きな視野角を設定できないので、ユーザがメルカトル画像上でモデリング領域を指定することで、透視投影の投影面を決定する。図8に、メルカトル画像から生成された透視投影画像を示す。

4. 曲面要素の自動抽出

次に、メルカトル画像として2次元的に配置された点群から曲面領域を抽出することを考える。

まず、曲面の探索領域を限定するために、メルカトル画像から連結領域を抽出して、点群を分割する。その際、画像上で隣接する2点が同一の曲面上に乗っているかどうかを判定する必要がある。レーザスキャナは、レーザ照射方向がほぼ等角度になるように制御されているので、点間距離は、光源からの距離が大きくなるにつれて増大する。

そこで、隣接点が同一面上に存在するかどうかを判定するために、同一曲面上に乗っているときの点間距離を計算する。ここで、 $\Delta \phi$ はレーザ光を照射するときの角度ピッチ幅、 \mathbf{n}_i は点 \mathbf{p}_i における法線とする。法線は近傍点の主成分分析によって計算する。このとき、角度ピッチ幅が微小であれば、点間処理は以下の式で計算される。

$$d = \frac{\Delta\phi|\mathbf{p}_i|^2}{(\mathbf{p}_i, \mathbf{n}_i)}$$

ここでは、隣接する点間距離が kd 以下のときは連結、それ以外は非連結と判定する。 k は定数で、誤差に応じて決める。ここでは $k=1.2$ とした。図 9 は、連結成分に従って画像を分割して色分けしたものである。

次に、連結領域に対して RANSAC 法を適用して、曲面領域を検出する。ここでは、Schnabel らの手法 [2] と同様に、平面はランダムな 3 個、円柱は 2 個の点から面の方程式を計算する。ただし、各点は、座標と法線を持つものとする。RANSAC 法では、最小個数の点から計算された方程式上に乗っている点の個数を数える。この操作を多数回繰り返し、最も多くの点に乗っている方程式を解とする。

RANSAC 法はロバストであるが、大きな領域から小さい曲面を検出するには、非常に多くの試行が必要となる。我々は、大規模点群を実用的な時間で処理するために、再起的な領域分割によって、曲面探索領域を限定する方法を用いた。

たとえば、床面や壁の部分は大きな連結領域なので少ない試行回数で検出可能である。そこで、適当な繰り返し回数で十分な個数の領域が検出された場合、検出された領域を点群から除去し、連結領域の更新を行う。領域が検出されるごとにそれを除外して連結領域を再計算すれば、領域は階層的に細分化される。本手法では、このようにして探索領域を限定していくことにより、RANSAC 法による曲面検出の確率を向上させ、計算時間の短縮を図っている。なお、曲面検出後は、最小 2 乗法 [3] を用いて、計算精度を向上させている。

図 10 は、検出された円柱と平面をそれぞれ示している。この例では、約 4000 万点の点群データから曲面抽出を行っており、3GHz の CPU、12GB のメモリを搭載した 64bit PC で計算時間は 4 分 50 秒であった。最大の曲面は 25 万点、最小は 300 点までを検出しており、さまざまなスケールの曲面領域が実用的な時間で検出できている。

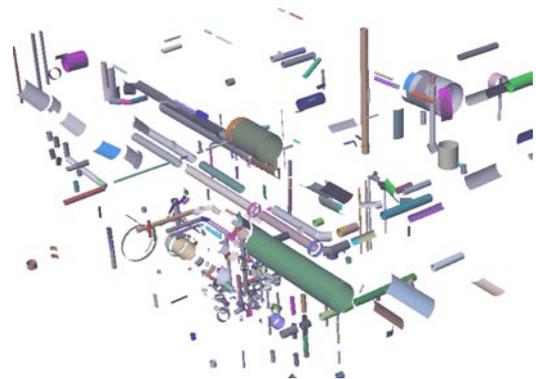
図 11 は、点群を検出した曲面に応じて色分けしたものである。この操作により、画像の各画素は曲面式と対応付けられる。この画像は、ユーザによるインタラクティブな 3D モデリングのために用いられる。

5. 画像インタフェースによる編集操作

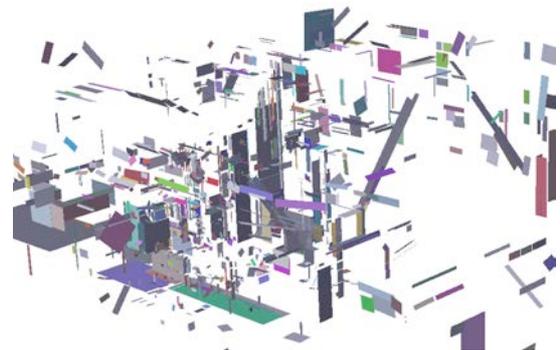
図 11 では、自動抽出された曲面領域の境界は正



図 9 連結成分の検出



(a) 円柱の抽出



(b) 平面の抽出

図 10 曲面自動抽出

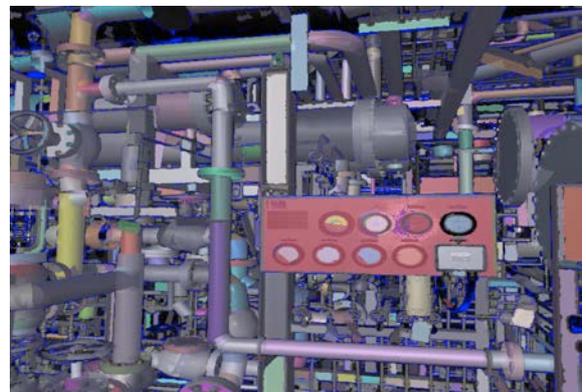


図 11 画像上への曲面の投影

確ではない。また、配管の径には誤差が含まれており、特に、高さの小さいフランジのような円柱は、軸の計算が適切に行えないといった問題がある。さらに、円柱を接続するエルボのようなトーラス形状はパラメータが多いために、ノイズの大きい点群から計算することは非常に難しい。

こうした問題に対処するために、面の境界情報や接続情報をユーザが画像上で指定し、編集作業を行うことによって正しい3Dモデルを作成することを考える。図7より、透視投影画像上の一点が指定されると、その点と原点を通る直線が3次元空間に作成できる。もし、その点がある曲面上に乗っていることがわかれば、直線と曲面との交点から座標が一意に決まる。この性質を利用して、ユーザの画像上でのインタラクティブな操作で3D形状を編集する。

図12は、画像上でユーザがスケッチを描き、平面の境界を作成した例を示している。平面の方程式は既に算出されているので、画像上に描いた多角形の頂点を平面上に投影すれば、3D空間での多角形が生成できる。また、マウスを用いて多角形をドラッグすることで、高さのある直方体を作成できる。

図13は、平面上の3点を指定して円弧を生成し、それをスイープして円柱を作成している例である。この例のように、円柱抽出に失敗したケースでも、平面部が得られていれば、画像をなぞりながら円柱を生

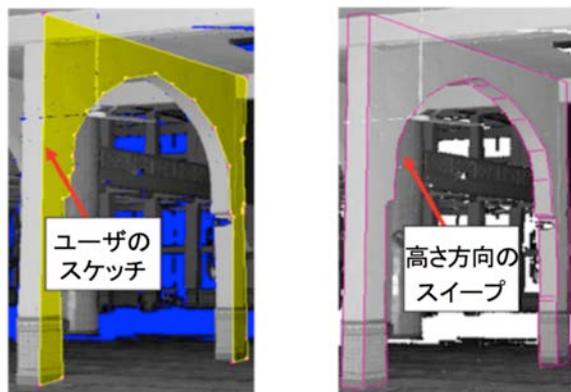
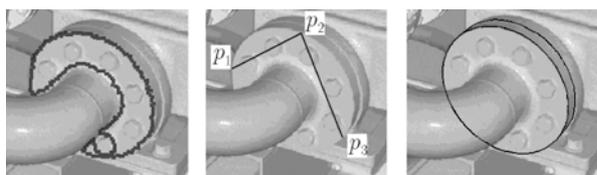


図12 スケッチによるモデリング



(a) 平面抽出 (b) スケッチ (c) 3次元モデル

図13 平面上のスケッチ

成することが可能である。

図14は曲面領域が適切に計算できなかった円柱に対して、長さをマウสดラッグによって編集している例である。右側は金具によって曲面が分断されており、左側はトーラスの一部を円柱上にあると誤判定して、配管の領域が適切に求まらなかったケースであ

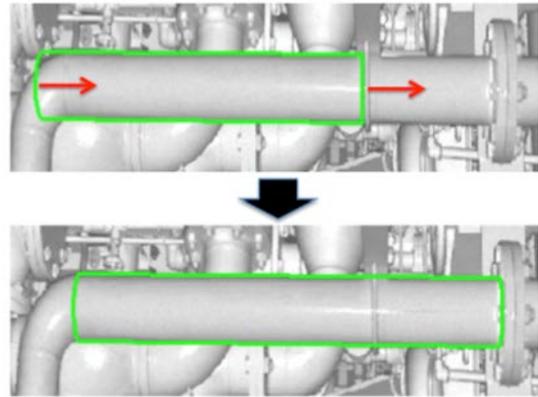
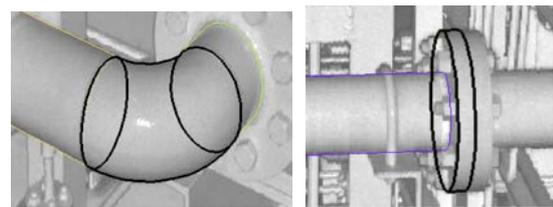
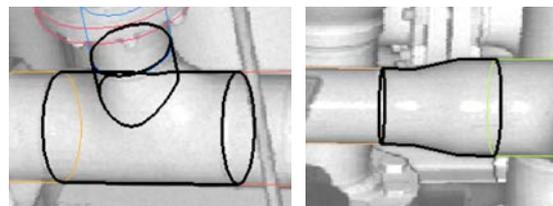


図14 寸法の変更



(a) エルボ

(b) フランジ



(c) ティー

(d) レジュューサ

図15 配管に接続する部材

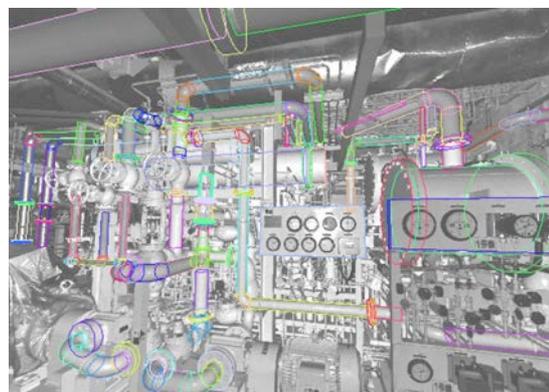


図16 作成されたフィーチャ

る。こうした部分は画像を確認すれば直ちに判明するので、画像を見ながら修正を行うことができる。

設備のモデリングでは、部材の接続関係から形状が決定する場合も多い。図 15 はそのような部品を示している。これらのエルボ、フランジ、突合せ、レギュレーサでは、接続する配管の径が決まれば寸法が確定する。たとえば、フランジは、長さの小さい円柱として検出できることもあるが、どの円柱と接続するかを指定することによっても寸法を決めることができ、位置も画像に合うようにマウスでドラッグして修正することができる。エルボやティーは、交わる二つの配管を指定すれば、位置と寸法を決定することができる。

図 16 は、編集作業によって得られたフィーチャである。本システムでは、画像インタフェースを用いているので、フィーチャを画像で確認しながら、直感的なモデリングを行うことが可能となっている。

6. まとめ

本研究では、高解像度で計測された大規模点群において、点群とレーザ反射強度画像を連携させた 3D モデリング手法を示した。本システムでは、前処理として点群から曲面抽出を行い、ユーザは点群から生成された画像上で操作を行うことにより、プラント設備の直感的なモデリング作業を行うことができる。

なお、本手法はフィーチャベースであるため、システムとしての完成度は、実装されているフィーチャの個数に依存する。現時点では、実装は JIS 規格の一部である配管部品と鋼材に限定されている。現実の設備モデリングに応用するためには、バルブなどのフィーチャを実装する必要がある。また、現状では、ユーザが画像上で編集作業を行うようになっているが、接続する部材については、配管の位置関係からある程度自動的にモデル生成できると思われる。今後は、そのための作業を行う予定である。

謝辞 本研究は科学研究費補助金(21360069)の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 増田宏:画像インタフェースを用いた大規模点群からのソリッドモデリングシステム, 機械学会論文集(C 編), Vol. 76, No. 771(C), pp.2748-2752, 2010.
- [2] R.Schnabel, R.Wahl, R. Klein: Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection, Computer Graphics Forum, Vol. 26, No. 2, pp. 214-226, 2007.
- [3] G.Lukacs, A.D.Marshall, R.R.Martin: Faithful Least

-Squares Fitting of Spheres, Cylinders, Cones and Tori for Reliable Segmentation. Proc. of 5th European Conference on Computer Vision, pp. 671-686, 1998.

増田宏: 東京大学工学系研究科システム創成学専攻准教授. CAD や CG の 3次元形状処理の研究に従事. 最近では, 中・長距離レーザスキャナを用いた大規模環境のモデリングや移動計測データ処理の研究を行っている.

松岡諒: 東京大学大学院システム創成学専攻 修士2年生. 現在, 大規模点群処理の研究を行っている.