

大規模点群に基づくインタラクティブな形状モデリングシステム

An Interactive 3D Modeling System based on Large-Scale Point-Clouds

増田 宏 (東京大)

Hiroshi MASUDA
Tokyo University

Mid-range and long-range laser scanners are useful for measuring large-scale engineering facilities. In this paper, we discuss a solid modeling system based on point-clouds captured from engineering facilities. When an engineering facility is measured by a laser scanner, the location of the scanner is restricted in most cases. Components of the engineering facility are only scanned from one side, and they are sometimes partially occluded by other components. To construct solid models using incomplete point-clouds, we propose a new image-based modeling approach combined with point-based modeling techniques. Since point-clouds captured by mid/long-range scanners have reflectance values as well as coordinates, their reflectance images can be used for image-based modeling. We show that our image-based modeling approach is useful for interactively complementing missing information. In addition, we show how to extract shape parameters as precisely as possible by considering industrial standards, assembly constraints, and user-specified constraints.

Key Words: *point-cloud, point-based modeling, image-based modeling, interactive modeling*

1. はじめに

近年、大型設備の計測ができるレーザスキャナ装置が注目されている。計測装置は急速に進歩しており、高性能化、小型化が進んでいる。しかしながら、小型製品のリバースエンジニアリングが広く普及しているのに対して、生産設備やプラント設備を対象とする現物の 3D モデリングについては有効なモデリングツールが乏しく、大型設備の 3D モデル作成のためにレーザスキャナが利用されることはまだ少ない。

本研究では、大型設備の現物モデリングを対象とした点群ベースの 3D モデリングシステムについて考える。大型設備のモデリングでは、小型製品のリバースエンジニアリングと比較して以下の点が異なっている。

- (1) 点の個数が膨大である：部材の入り組んだ設備全体を計測しようとすると、数千万程度の点群を数箇所から計測する必要がある。
- (2) ノイズが大きく、大量の異常値が含まれる：大型設備計測で用いられる飛行伝播時間計測方式や位相差方式では、特にエッジ部分において、複数の異なる面からの反射光を同時に受光する Mixed Pixel と呼ばれる現象が避けられず、異常値が大量に発生する。また、黒っぽい部材は反射光が減衰するために環境光の影響を受けやすく、ノイズレベルが増大する[1]。
- (3) 不完全な点群しか得られない：小型部品の計測では全方向からの点群計測が可能であるが、設備計測では計測地点が限定されるため、裏側が計測できない、他の部材に隠される、という問題が避けられない。また、細い対象物や薄い対象物では十分な密度の点群が得られない。

我々は、これまでの研究によって、上記(1)(2)の問題については、ほぼ解決することができた[2]。膨大な点群に対しては、ストリーミング方式の点群処理を行うことで、メモリ容量を超える点群であっても処理が可能であり、また、ノイズや異常値の処理については、ロバスト推定を用いることで安定した平滑化ができることを示した。これらの処理の適用においては、大規模点群に対してオフライン処理を行うことで、平滑化された大規模メッシュモデルが作成できる。

本研究では、上記の(3)で示した問題を解決するために、不完全な点群から全体の形状を復元するための方法について示す。ここでは、欠落した情報を補うために、イメージベース手法とフィーチャベース手法を用いた、インタラクティブな立体モデリングシステムを提案する。

先行研究では、不完全な点群を用いた大規模対象物のモデリングでは完全な自動処理は困難であり、

(a) ユーザインタラクションが必要となること、

(b) 半自動化には対象物の知識が必要となること、

が示されている。Chen らは、建築物の特徴を考慮して、点群を包含する多面体の生成を行っている[3]。ただし、形状モデルとしては概略形状のみが生成され、細部はテクスチャーで表現している。Xu らは、点群を用いた木のモデリングのために、木の生成規則を知識として用いている[4]。ただし、点群を用いて幹を推定しているものの、生成される木は現物と同じではない。これらの研究は、詳細かつ正確なモデリングが要求される我々の研究とは方向性が異なっている。

本研究では、生産設備やプラント設備の改修や撤去、作業計画の立案の検証などに利用できる 3D モデル生成を想定している。そのため、位置や部品寸法に関して、出来る限り正確にモデリングすることが求められる。

本研究では、この目的のために、以下のアプローチを取る。

- (a) レーザ反射強度を明暗画像として表し、イメージベースモデリングの手法を用いたユーザインタラクションを実現する。
- (b) 対象物の知識を活用するために、フィーチャベースのモデリング手法を用いる。工業設備では規格品が非常に多いため、構成部材に応じたフィーチャを用意しておくことで、モデリング効率を向上させる。
- (c) 部材パラメータの計算には非線形最適化が必要なため、様々な制約条件を用いて、変数の自由度を出来る限り少なくして解の精度や安定性を高める。

次章では点群のレーザ反射強度から生成される画像について示し、3章では画像と点群との関連付けの方法を示す。4章ではフィーチャベースモデリングの手法について示し、最後に結論を示す。

2. 点群からの画像の生成

2.1 球面投影による点群画像

レーザスキャナでは、図1(a)に示すように、方位角 θ と仰角 ϕ によってレーザの照射方向が決められる。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点に重なることなく写像できる(図1(b))。

飛行伝播時間計測方式と位相差方式のレーザスキャナでは、点群の計測時に座標とともに、レーザ反射強度が得られる。本研究では、球面上に投影された点群のレーザ反射強度を用いて生成された画像を球面画像と呼ぶ。レーザ反射強度はdB等を用いて表現されるが、この値を $[0, 255]$ に正規化すると、図2,3,4で示したような明暗画像を生成できる。

球面画像は、図2に示すように、球面に画像をテクスチャとして貼り付けることで描画できる。ただし、テクスチャ画像のメモリは大きくないことが多いので、大容量の点群では画像の解像度を落とす必要がある。

また、視点を球の中心に固定し、視線方向をマウスドラッグ等で移動させることによって、図8(c)のように、画像と3Dモデルを同時に描画することが可能である。

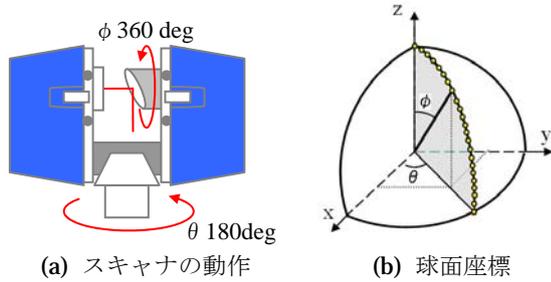


図1. レーザ計測装置と球面座標。



図2. 球面画像

2.2 メルカトル図法による点群画像

点群全体を概観するためには、すべての点群が平面上に写像されていると都合がよい。球面全体を平面に展開する方法としてよく用いられるのがメルカトル図法である。

メルカトル図法では、方位角と仰角 (θ, ϕ) をX, Y座標と見做して、球面を平面に展開する。図3は、球面上に写像された点群のレーザ反射強度をメルカトル図に展開したものである。5000万点から生成される画像でもデータ量は200MB程度なので、通常のPCでも詳細な画像を実メモリ上に保持できる。ユーザはこの画像上でモデリング領域を指定したり、細部を確認したりすることができる。

2.3 透視投影による点群画像

メルカトル図法では、直線が曲線に写像され、画像は極に近づくほど大きく歪む。このため、画面上でユーザがスケッチしたりする操作には適していない。

3次元空間の直線を2次元の直線に写像する代表的な投影法が透視投影である。図5は、3次元のモデル座標系、球面座標系、メルカトル図の座標系、透視投影画像の座標系の関係を示したものである。図からわかるように、メルカトル図の座標と透視投影画像の座標は1対1で対応する。



図3. メルカトル図法による点群画像

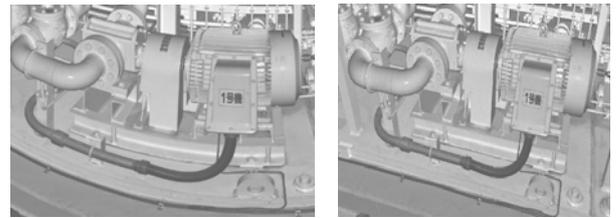


図4. 透視投影による点群画像

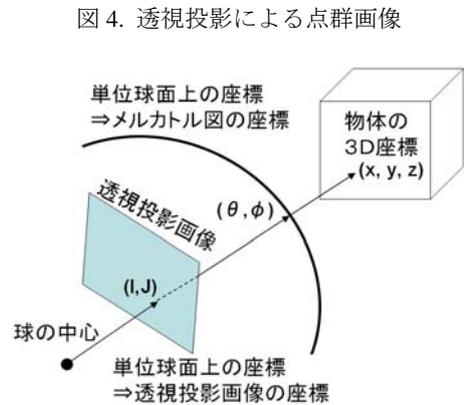


図5. 複数の座標系の関係

ただし、メルカトル図が 360° 全方位を記述できるのに対し、透視投影では大きな視野角を設定すると画像が極端に歪む。そこで、本研究では、ユーザがモデリング領域をメルカトル図上での矩形領域によって指定することで、透視投影の注視点と視野角を設定できるようにしている。

本研究では、透視投影画像は、メルカトル図法で表現された詳細な画像の一部を用いて作成する。図4(b)に示す透視投影画像は、図4(a)のメルカトル図を座標変換して生成したものである。本研究では、透視投影画像は、ユーザがモデリングを行う上での主要なインターフェースとして用いる。

3. 画像と点群との連携

大規模点群から平滑なメッシュモデルを生成する方法については、既に論文[2]に示しているが、ここでは、大規模メッシュモデルを点群画像と関係付けることを考える。図5に示した通り、透視投影の投影面が既知であれば、透視投影画像上の点 (I, J) は、メルカトル図の座標 (θ, ϕ) に容易に変換できる。そこで、大規模メッシュモデルの頂点をメルカトル図の座標と関連付ける。

5000万点規模の点群から生成されるメッシュモデルは、1GB(隣接関係を面だけに持たせる場合)から2GB(各点から隣接点へのポイントを陽に持つ場合)になる。このサイズのデータは、通常のノートPCの実メモリに展開するには制約が大きいか、データの読み込みに非常に時間がかかり、

インタラクティブな処理の操作性を損なってしまう。そこで、メッシュデータは実メモリに展開せずハードディスク上に保持し、必要な部分だけを適宜読み込む方法を用いる。

大規模メッシュを out-of-core で扱う方法として、ストリーミングメッシュが知られている[5]。この方法は、ハードディスクから読み込んだ順にメッシュを再構成する方法で、メモリ容量を超える規模のメッシュでも処理することが可能である。しかし、メッシュデータを最初から読み込むことが必要で、ランダムアクセスを行うことはできない。

そこで本研究では、点群を図6に示すように、格子に分割して管理する。個々の矩形をセルと呼ぶことにする。ここでは、各セルに含まれる点の個数が400個程度になるように格子を設定した。セルには番号を付け、メッシュのすべての頂点は、セル番号とセル内の頂点番号によって一意に指定される。また、メッシュにおいて連結な頂点同士は、双方向でポインタを付けておく。また、ヘッダとして、すべてのセルの先頭アドレスと頂点数を保持しておき、この情報については、実メモリ上に展開しておく。

このようなデータ構造は、大規模メッシュから曲面などの領域抽出を高速に行うのに適している。曲面抽出は、領域成長法を用いて、以下の手順によって行える。

- (1) ユーザが透視投影画像上で閉領域を選択する。
- (2) 閉領域に該当するメッシュモデルのセルをハードディスクから実メモリに読み込む。
- (3) 読み込まれた点群から閉領域に含まれる頂点を選択する。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、ユーザの選択に基づいて、平面や円柱などの曲面式を当てはめる。
- (5) 隣接頂点を調べ、曲面式に乗っていれば、その頂点を追加する。もし、隣接頂点がまだメモリに展開されていなければ、その頂点を含むセルを読み込む。
- (6) 追加された頂点を用いて曲面式を再計算する。
- (7) 以上の操作を繰り返して、曲面領域と曲面の方程式を抽出する。

この処理では、曲面領域の探索に必要なセルしかロードされないため、少ないメモリでも大容量のメッシュモデルを効率的に処理できる。図7に平面と円柱の抽出例を示す。

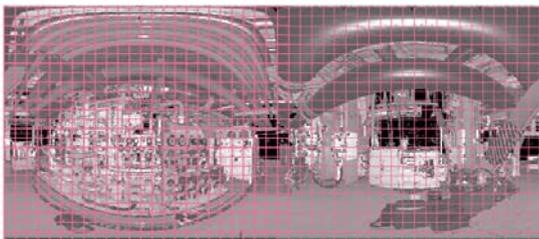


図6. レーザ計測装置と球面座標

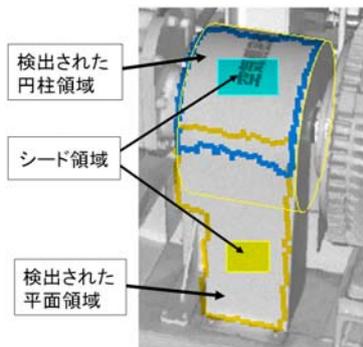


図7. 曲面領域の抽出

4. フィーチャベースモデリング

4.1 グラフィカルインターフェース

本研究では、点群と点群画像を用いた立体モデリングシステムを試作した。本システムは、図8に示す4通りの表示画面を持ち、GUI上で適宜切り替えることができる。

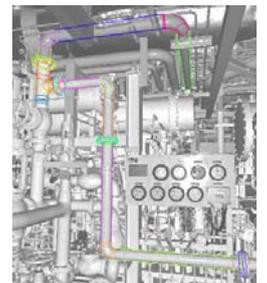
ユーザは、図8(a)のメルカトル画像に矩形領域を描き、モデリング領域を選択する。システムは、その矩形領域から透視投影画像を作成し、ユーザはこの画像上で3Dモデリングを行う。また、図8(b)の透視投影画像には、3Dモデルをワイヤフレームで上書きすることができる。図8(c)の球面画像は、球の中心を視点として、3Dモデルと重ねて表示したものである。図8(d)は、通常の3D表示である。

図9は、立体モデリングの例を示している。ここでは、まず既に述べた曲面抽出を行い、それを基準面とすることで立体モデリングを行っている。図9(a)では、円柱を抽出している。径と軸方向は正しく計算されているが、長さについては他の部品に隠されているために正しく求められていない。このような場合、透視投影画像上で、ユーザがマウスドラッグによって長さを変更できる。図9(b)は、平面抽出に基づいて立体モデルを生成した例である。この例では、基準面に垂直な面上にユーザが断面図をスケッチすることで、スイープ形状を生成している。

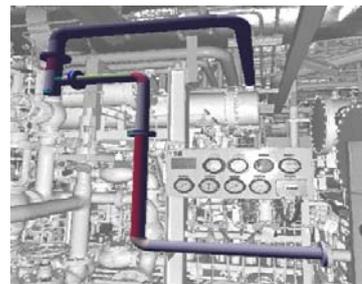
形状操作ツールとしては、現在のところ、面上/軸上の平行移動、法線/軸方向への面のスイープ、面上での回転操作を実装している。いずれも透視投影画像上で操作を行い、マウス操作に連動して3Dモデルのワイヤフレームがリアルタイムに表示される。



(a) メルカトル画像



(b) 透視投影画像

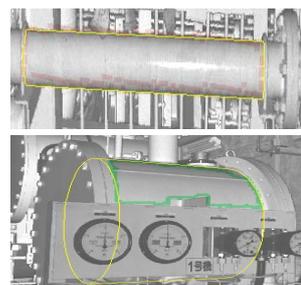


(c) 球面画像

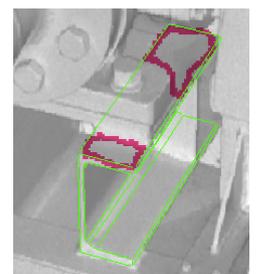


(d) 3D ビュー

図8. 描画画面



(a) 円柱抽出と立体生成



(b) 平面抽出と立体生成

図9. 立体のモデリング方法

4.2 規格品フィーチャ

生産設備やプラント設備では、ほとんどの構成部材は規格品であり、JIS 等によって寸法が決められている。したがって、ユーザが部材の種類を選択した上でモデリングを行えば、規格品の制約条件を利用できる。

図 9(a) の上図の例では、曲面当てはめによって計算された円柱の直径は 87.6 mm であるが、配管の規格にはそのような寸法は存在しない。JIS 規格によれば、一般構造用炭素鋼鋼管の規格は、図 10 のように規定されており、計測された直径に近いものは、89.1 mm しかない[6]。そこで、配管をモデリングしている場合には、直径をこの値に置き換える。円柱の式は 5 変数であるが、直径が決まれば 4 変数になるので、円柱の軸を再計算して精度を高める。

我々は、曲面計算に関して、様々な制約に応じた最適化計算のパッケージを実装しており、規格や他の制約からパラメータが確定した場合、自由度を減らして曲面式を再計算してモデリング精度を高める方法を用いている。

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 11(a) のフランジや (b) エルボ、(c) 突合せでは、接続する配管の径が決まれば基本的な寸法がほぼ確定する。複数の選択肢がある場合でも、透視投影画像上にワイヤフレーム表示を行えば、妥当なパラメータを容易に選択できる。図 11(d) 接続する円柱が短く、高精度で計算できないため、抽出された平面上の 3 点を指定して円弧を作成し、スイープして作成したものである。この場合も、規格表から直径は離散的な値となる。

JIS G 3444-1994			参考			
外径 mm	厚さ mm	単位重量 kg/m	断面積 cm ²	断面二次モーメント cm ⁴	断面係数 cm ³	断面二次半径 cm
21.7	2.0	0.972	1.238	0.607	0.560	0.700
27.2	2.0	1.24	1.583	1.26	0.930	0.890
	2.3	1.41	1.799	1.41	1.03	0.860
34.0	2.3	1.80	2.291	2.89	1.70	1.12
	2.5	2.29	2.919	5.97	2.80	1.43
42.7	2.5	2.48	3.157	8.46	3.00	1.42
	2.8	2.83	3.345	8.99	3.20	1.64
48.6	2.8	3.12	3.533	9.65	3.42	1.82
	3.0	3.32	3.721	10.5	3.66	1.94

図 10. 配管の規格の例

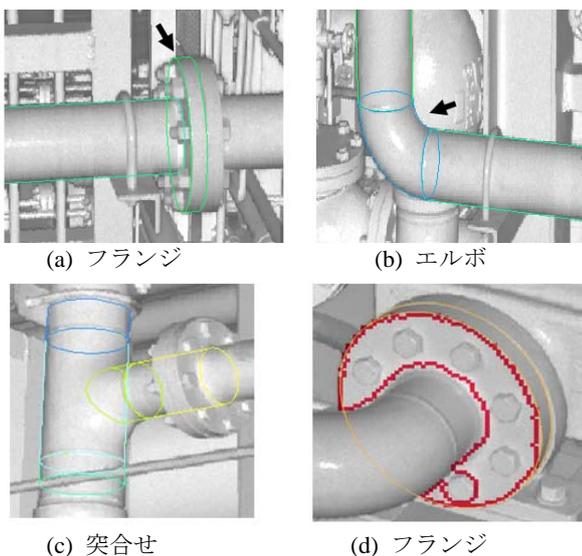


図 11. 規格部品のモデリング

4.3 曲面計算の安定化

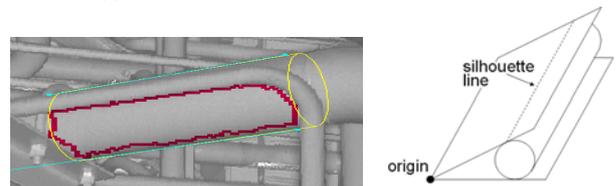
曲面計算を行う場合、一部が他の部材によって隠れていると、パラメータが正しく計算できない可能性が高くなる。図 12 は、一部が他の部材で隠されている配管を示し

ているが、いずれの場合も単純な曲面計算では正しく径を算出することができない。このような場合、ユーザが制約を与えることで安定的に計算できる仕組みを用意する。

図 12(a) は、直交する円柱を指定することで、径と軸に対して制約を与え、3 変数の最適化問題に帰着させて計算を安定化させた例である。図 12(b) は、ユーザが円柱の母線を画面上でスケッチし、その制約を用いて計算を安定化させた例である。この場合、計算上は、自由度は直径のみになるが、軸の奥行き方向の位置と角度に関して誤差が生じやすくなるため、直径を算出した後に、位置と角度に関する 2 変数最適化問題として再計算し、精度を高めている。



(a) 直交する円柱を用いた 3 変数最適化問題



(b) スケッチによる母線を用いた 2 変数最適化問題

図 12. 部分的に隠された部材のモデリング

5. まとめ

本研究では、点群を用いた立体モデリングを行うために、点群画像を用いたインタラクティブなモデリング手法について示した。大規模設備のモデリングでは、不完全な点群から正確な曲面式を計算することが求められる。本研究では、点群画像を用いたユーザインタラクション、工業規格、他部材との接続、ユーザスケッチ、その他のユーザ指定の制約を用いることで、現物の立体モデリングを行えることを示した。

本システムはフィーチャベースであるため、現実のモデリングに応用するためには、多様なフィーチャを用意する必要がある。また、ユーザやベンダが比較的容易にフィーチャを定義できる仕組みも必要である。さらに、現状では、ユーザがシード領域を指定しているが、典型的なフィーチャについては自動認識できることが望ましい。

また、現実の計測では、複数地点から計測した点群を位置合わせて利用する。本研究で作成される 3D モデルは、レジストレーションに対応したものとなっているが、複数の点群データを連携させることで、曲面計算をさらに安定化させることができると考えられる。

今後はこれらの課題について取り組んでいく予定である。

参考文献

1. D. Langer, M. Mettenleiter, F. Härtl, C. Fröhlich, Imaging Ladar for 3-D Surveying and CAD Modeling of Real-World Environments, Int. J. of Robotics Research 19(11), 1075-1088, 2000.
2. H. Masuda, I. Tanaka, Extraction of Surface Primitives from Noisy Large-Scale Point-Clouds, CAD&A, 6(3), 387-398, 2009
3. J. Chen, B. Chen, Architectural Modeling from Sparsely Scanned Range Data, Int. J. of Computer Vision, 78(2-3), 223-236, 2008.
4. H. Xu, N. Gossett, B. Chen, Knowledge and Heuristic-Based Modeling of Laser-Scanned Trees, ACM Tran. of Graphics, 26(4), Article 19, 2997.
5. M. Isenburg, P. Lindstrom, Streaming mesh, Visualization'05, 231-238, 2005.
6. JIS ハンドブック配管, 日本規格協会, 2009.