

画像インタフェースを用いた 大規模点群からの3次元形状モデリングシステム

東京大学 増田 宏

本研究では、中距離のレーザスキャナから取得された点群データを用いて、プラント設備の3次元形状モデリングを行う手法について示す。プラント設備では、計測地点が限定されるため、計測点の欠落が避けられない。そのため、点群のレーザ反射画像をインタフェースとして用いて、インタラクティブにモデリング作業を行うことを考える。点群データをメッシュモデルに変換し、メッシュと画像との対応関係を保持することで、画像上でのユーザ操作に応じて、メッシュに対する3次元処理が行う手法について示す。

○ はじめに

近年、中・長距離の計測ができるレーザスキャナが急速に進歩している。レーザスキャナは、対象物の表面にレーザ光を照射し、照射点の3次元座標を点群として取得する。従来、CGの分野では、三角測量の原理を用いて数cmから2m程度の小型の物体を対象とすることが多かったが、地形測量などの分野では、異なる計測方式を用いて大規模な対象物の3次元計測が行われる。近年、測量分野のレーザスキャナの計測速度と点群密度が飛躍的に向上した結果、市街地、生産設備、交通網などの大規模環境を計測して3次元モデリングを行うことが可能になってきた。

本研究では、中距離のレーザスキャナを利用したプラント設備の3次元モデリングについて考える。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、保守や改修作業の検証のために、現況を忠実に再現した3次元モデルによるシミュレーションのニーズが強い。そのためには、プラント設備を構成する配管や鋼材などの構成要素を3次元モデルとして再構成することが要求される。

大規模環境の計測で用いられるレーザスキャナでは、飛行伝播時間計測方式 (time-of-flight) または位相差方式 (phase-based) に基づく計測手法が用いられる。飛行伝播時間計測方式は、対象物にレーザを照射し、その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。一方、位相差方式では、変調したレーザ光を連続的に照射し、反射波の位相差を用いて距離を計測する。前者は数百mの長距離が計測できるが、計測速度は毎秒5万点から10万点程度とやや遅い。位相差方式は中距離を計測するのに用いられ、機種にもよるが、限界距離が50mから200m程度である。一方で、

計測速度は毎秒50万点から100万点であり、非常に高速に計測できるのが特徴である。

しかしながら、大量の点群が取得できたとしても、設備の計測では計測地点が限定されるため、部材の裏側が計測できないことが多い。また、他の部材に隠されてレーザ光が照射できない箇所でも計測点の欠落が起こる。こうした問題を回避するためには、設備の一部を撤去したり、足場を組んだりすることが必要となるが、稼働中の設備では許容されないことが多い。

そのため、形状モデリングでは、不完全な点群を前提にすることが求められる。その場合、図1(a)のように、点群は複雑に断片された断片の集合として得られるので、作業者が元の形状を推定するには、別に取った写真を参照したり、現場に精通した技術者の支援を求めたりすることが必要となる。

本研究では、この問題に対処するために、点群から生成された画像をインタフェースとして用いた3次元モデリングシステムを考える。

画像ベースでモデリングを行う手法として、フォトグラメトリが知られている。この方法では、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。作業の手間がかかるが、図1(b)の画像のように、作業者が部品の構成を直感的に理解してモデリングするのに適している。一方、図1(a)のメッシュモデルは3次元情報を陽に保持しているため、計算機処理が行いやすい。

そこで、本研究では、メッシュ処理とフォトグラメトリの利点を融合するために、メッシュモデルとデジタル画像を関連付ける。それにより、作業者と計算機が協働的にモデリング作業を行える環境を実現する。一般に、中・長距離レーザスキャナによる計測では、座標に加えて、レーザ反射強度が得られる。そのため、レーザ反射強度の値を明暗値として平面上に投影することで、十分な解像度の明暗画像を生成できる。また、画像とメッシ



(a) 点群から生成されたメッシュモデル



(b) 点群から生成されたレーザ反射強度画像

第1図 メッシュモデルと画像

メッシュモデルを連携させたフィーチャモデリングによって、多数の部品が混在した状況での部材のモデリングを行うシステムについても考える。

○ 点群からの画像の生成

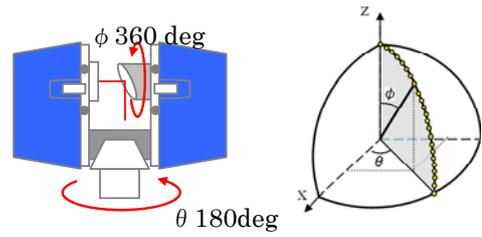
メルカトル図法による画像生成

一般に、1回のレーザスキャンで得られた点群の座標は、計測装置を原点とした座標系で記述される。本研究においては、計測装置原点の座標系で記述された点群を対象とする。なお、複数箇所から計測された点群データが存在する場合には、基準座標系に変換するための変換行列が点群ファイルのヘッダとして記述され、点群は計測装置原点の座標系で記述されているものとする。このフォーマットは、中・長距離のレーザスキャナの出力ファイルとして一般に用いられているものの一つである。

レーザスキャナでは、図2(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。角度の取り方を図2(b)に示すように決めると、座標は照射方向 (θ, ϕ) における距離 r として得られる。

点群の計測時には、レーザ反射強度も得られる。レーザ反射強度は dB 等を用いて表現されるが、この値を $[0, 255]$ に正規化することで明暗画像を生成できる。図3は、 (θ, ϕ) 方向に照射されたレーザの反射強度を球面上に表示したものである。

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

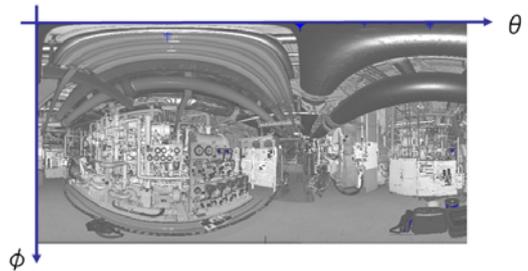


(a) レーザスキャナ (b) 球面座標

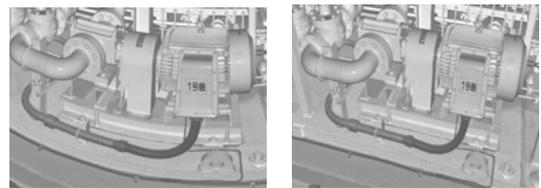
第2図 レーザスキャナと球面座標系



第3図 球面に投影された画像

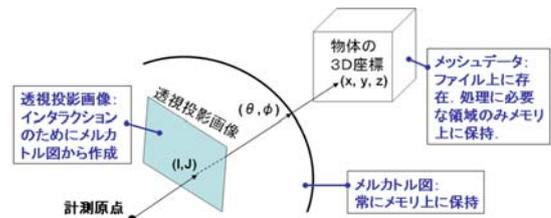


第4図 点群全体のメルカトル画像



(a) メルカトル画像 (b) 透視投影画像

第5図 透視投影画像への変換



第6図 透視投影画像とメッシュとの対応

る。メルカトル図法では、方位角と仰角 (θ, ϕ) を主軸と

して用いることで、球面を平面に展開する。図4に、図3の球面画像から得られたメルカトル画像を示す。

透視投影画像への変換

メルカトル図法は球面全体を表示するには適しているが、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。

3次元空間の直線を平面の直線に写像する手法としてよく知られているのが透視投影である。そこで、本研究では、ユーザが指定したメルカトル画像の一部の領域を透視投影画像に変換し、ユーザがインタラクションするためのインターフェースとして用いることにする。メルカトル図法が 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できない。そのため、ユーザがメルカトル画像上でモデリング領域を矩形領域として指定することで、透視投影変換の投影面を決定する。図5は、メルカトル画像上の一部領域を透視投影画像に変換した例を示している。

○ 画像インターフェース

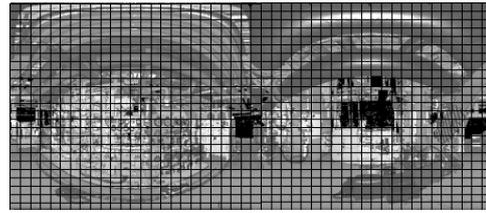
画像と点群との関連付け

点群は、メルカトル画像上に規則正しく並ぶので、この関係を利用して点群からメッシュモデルを生成することができる⁴⁵⁾。

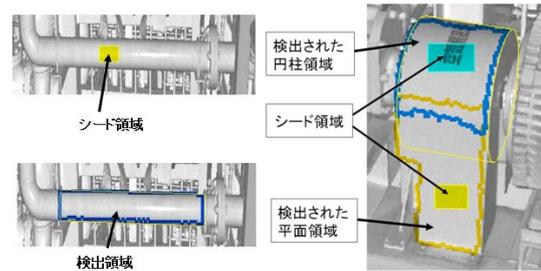
ここでは、点群から生成された大規模メッシュモデルを用いてソリッドモデルを作成するために、画像をインターフェースとして用いる。図6は、3次元モデルの座標 (x, y, z) 、メルカトル画像の座標 (θ, ϕ) 、透視投影画像の座標 (i, j) の関係を示している。 (i, j) と (θ, ϕ) は一対一に対応し、メルカトル画像および透視投影画像上の点は、メッシュモデルの頂点に対応する。

ただし、5000万点規模の点群から生成されるメッシュモデルは非常に大きく、データ量は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タを持つ場合）になる。このサイズのデータを処理するには、32ビットPCでは実メモリの制約が大きく、また64ビットPCを用いたとしてもデータ読み込みに非常に時間がかかり、モデリングの操作性を損なってしまう。

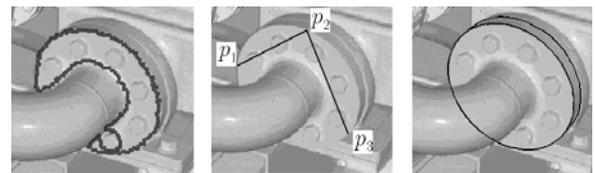
そこで、メッシュデータは実メモリに展開せずにハードディスク上に保持し、必要な部分だけを適宜読み込む方法を用いる。大規模メッシュをハードディスクから読み込みながら逐次処理する方法として、ストリーミングメッシュ⁷⁾が知られているが、メッ



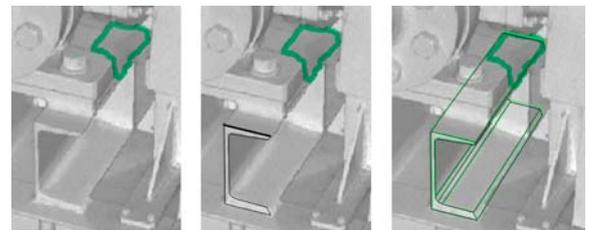
第7図 格子構造によるメッシュデータの保持



第8図 領域成長法による曲面抽出



(a) 平面抽出 (b) スケッチ (c) 3次元モデル
第9図 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
第10図 垂直面上のスケッチ



第11図 垂直な描画面の生成

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、点群がメルカトル画像上に投影できることを利用して、点群を図7に示すような格子に分割して管理する。ここでは、それぞれの格子をセルと呼ぶ。セルの個数は、各セルに含まれる点の個数が数百個程度になるように設定する。

セルにユニークな番号を付けておくと、メッシュモデルのすべての頂点は、セル番号とセル内の頂点番号によって一意に指定できる。そこで、メッシュモデルの各頂点をセルごとにハードディスク上に格納する。このデータ構造を用いることによって、必要なセルの頂点を適宜ハードディスクから読み込んで実メモリ上に展開することが可能となるため、大規模なメッシュモデルでもメモリ容量の少ないPCでも処理することができる。

曲面情報の抽出

このデータ構造を用いて、大規模メッシュから曲面領域の抽出を行う。曲面抽出は、メッシュ処理でよく用いられる領域成長法を用いて、以下の手順で行う。

- (1) ユーザが透視投影画像上で閉領域を選択する。図8では、矩形領域がその閉領域に相当する。
- (2) 閉領域に該当するメッシュモデルの頂点をハードディスクから読み込む。
- (3) 閉領域に含まれる頂点をシードとする。シードとは領域成長法で用いられる用語で、曲面抽出のために最初に入力される頂点集合である。
- (4) シードの頂点に対して、平面や円柱などの曲面式を当てはめる。曲面の種類はユーザが指定する。
- (5) シードに含まれる頂点に隣接する他の頂点を調べ、曲面式に乗っていればその頂点をシードの頂点リストに追加する。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読み込んでメモリ上に展開する。
- (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得る。

この処理では、曲面領域の探索に必要なセルしか実メモリ上に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8に平面と円柱の抽出例を示す。

○ 画像インタフェースによるモデリング

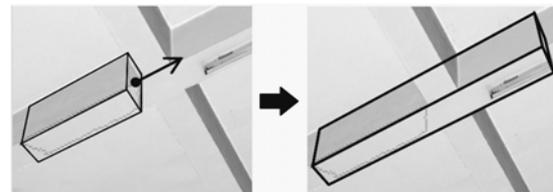
画像上でのスケッチによるモデリング

図8の結果からわかるように、点群計測では、曲面式は比較的正確に求まるが、境界エッジの情報には正確に求められないことが多い。そこで、面の境界情報をユーザが画像上にスケッチすることで指定することを考える。

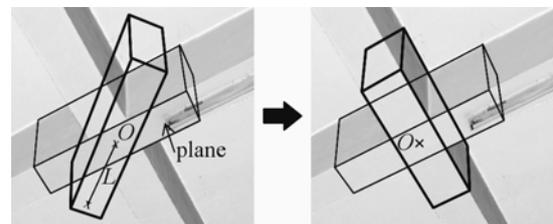
図5の関係を考えれば、透視投影画像上の一点が決まると、その点と原点を通る直線が作成できる。画像上の点に対応する3次元座標はこの直線上に乗っているため、点に乗っている曲面が既知であれば、直線と曲面との交点として3次元座標が一意に決まる。この性質を利用して、ユーザが画像上で行うスケッチから3次元図形を作成する。

図9は、抽出された平面上のスケッチから円柱モデルを作成した例である。この操作では、まず、円柱上面の平面 P の方程式を領域成長法で算出する(図9(a))。次に、ユーザが画像上で円弧上の3点 p_1, p_2, p_3 を指定する(図9(b))。各点は平面上に乗っていることから、対応する3次元座標 v_1, v_2, v_3 が計算でき、これらを通る円として円柱の上面が決定する。円柱の高さは、画像上でマウスをドラッグして決める(図9(c))。

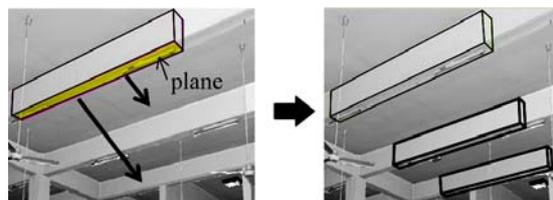
図10は、抽出した平面に垂直な断面を描くことでモデリングを行う操作を示している。この例では、断面部の面積が小さいため、正確な平面式を求めることが難しい。そこで、まず抽出が容易な部品上面の平面を求める。スケッチは、その垂直面上で行う。垂直面は、図11に示すように、平面上の2点 v_1, v_2 が決まれば一意に算出で



(a) スイープ操作



(b) コピーと回転



(c) コピーと平行移動

第12図 編集操作

きる。従って、図 10(b)の太線で示すように、スケッチする最初の 2 点で垂直面が決まる。垂直面上にスケッチした閉領域に対して高さを与えれば、多角柱のソリッドモデルを作成することができる (図 10(c))。

編集操作

画像上で選択した座標 (i, j) は、既知の曲面上に投影することで 3 次元座標 (x, y, z) に変換できる。この操作を用いて、ソリッドモデルのスweep、回転、平行移動などの編集操作も実現できる。

いずれの操作も透視投影画像上で操作を行い、マウス操作に連動して編集後の 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。ソリッドモデルの各面は、画像上の位置を指定することで選択できる。

図 12(a) では、ソリッドモデルの面を一つ選択し、マウスをドラッグすることで高さを変更する操作を示している。図 12(b) は回転を示しており、この場合も、面上の 2 点を指定して回転中心 O と回転軸 L を与えることで、マウス操作に応じた回転ができる。図 12(c) は平行移動であり、マウス操作に応じてソリッドモデルが平面上を平行移動する。

○ フィーチャモデリング

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 規格などで寸法が決められている⁸⁾。従って、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、規格に適合した寸法のソリッドモデルを作成することが可能となる。また、規格値がわかっている場合、曲面抽出の際の変数の個数を減らせるため、計算精度を向上させることも可能である。そこで、規格を適切に反映させるため、本研究では、ユーザが部材の種類をフィーチャメニューで選択してモデリングを行うフィーチャモデリング手法を用いる。

図 13 に配管のモデリングの例を示す。ユーザは配管フィーチャを選択してから、曲面抽出を行う。それによって、図 13(a) に示す円柱領域が抽出される。ただし、配管の寸法は規格に定められており、配管の径は離散的な値しか取ることができない。離散的な規格寸法しか取れない場合には、まず制約なしで曲面抽出を行い、得られた曲面に最も近い寸法値を規格表から選択するものとする。その後、規格寸法を既知として曲面式を再計算して計算精度を向上させる。

配管の例では、JIS 規格で一般構造用炭素鋼鋼管の規格⁹⁾が図 14 のように規定されており、図 13 の円柱の直

径に最も近い値として直径が 89.1 mm と決まる。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計算精度を高めることができる。

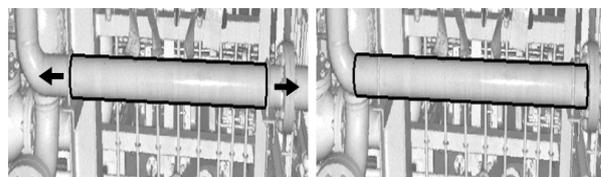
なお、他の部品で一部が隠されている場合、配管全体は抽出できない。この例では、配管を固定するための部品が配管を遮っているため、領域成長法では配管の一部領域しか抽出できない。そこで、前章で述べたスweep操作を用いて、画像を見ながら配管の長さを調節することで配管のソリッドモデルを作成する (図 13(b))。

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、レジューサでは、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、適切なパラメータを容易に選択できる。

本研究で作成した形状モデリングシステムでは、図 9,10 に示した断面スケッチで作成できる鋼材と、図 13,15 の規格部品のためのフィーチャメニューが用意されている。図 16 は、それらを用いてモデリングを行った例で、座標値は基準座標系に変換されている。いずれの部品も画像上での簡単なマウス操作で現物に忠実なモデルが作成できる。

○ おわりに

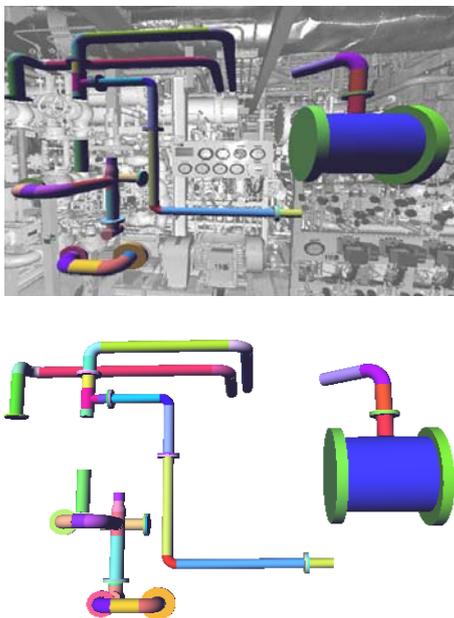
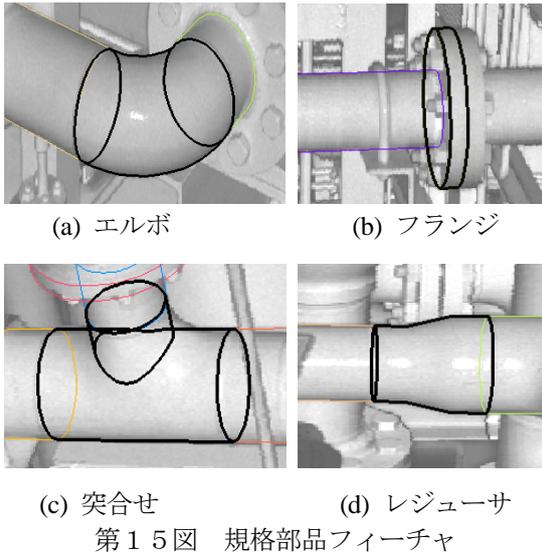
本研究では、高解像度で計測された大規模点群において、メッシュモデルとレーザ反射強度画像を連携させた新しいフィーチャモデリング手法を示し、直感的なモデリング作業が行えることを示した。



(a) 円柱面 (b) 配管フィーチャ
第 1 3 図 配管フィーチャの作成

JIS G 3444-1994			thickness
外径 mm	厚さ mm	単位重量 kg/m	
21.7	2.0	0.972	
27.2	2.0	1.23	
34.0	2.3	1.41	
42.7	2.3	1.80	

第 1 4 図 配管の JIS 規格表



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が、他の規格部品やバルブなどのフィーチャを実装することで、より多くの対象物のモデリングが可能である。また、フィーチャの種類を入れ替えることで、建築物や交通網のモデリングにも対応可能であると考えられる。

文 献

- (1) Langer, D., Mettenleiter, M., Härtl, F., Fröhlich, C., Imaging Ladar for 3-D Surveying and CAD Modeling of Real-World Environments, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 19, No. 11 (2000), pp. 1075-1088.
- (2) Chen, J., Chen, B., Architectural Modeling from Sparsely Scanned Range Data, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 78, No. 2-3 (2008), pp. 223-236.
- (3) Xu, H., Gossett, N., Chen, B., Knowledge and Heuristic-Based Modeling of Laser-Scanned Trees, *ACM Transaction of Graphics*, Vol. 26, No. 4, (2007), Article 19.
- (4) 増田宏, 村上健治, 大規模点群データの平滑化手法に関する研究: ロバスト推定に基づく平滑化手法, *精密工学会誌*, 76(5), pp.582-586, 2010..
- (5) 増田宏, 村上健治, 大規模点群データの平滑化手法に関する研究: 大規模点群平滑化のためのストリーミング処理, *精密工学会論文誌*, 76(6), pp.689-693, 2010.
- (6) 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)*, 76(771), pp.2748-2752.
- (7) Isenburg, M. and Lindstrom, P., Streaming mesh, *Proceeding of Visualization'05*, (2005), pp. 231-238.
- (8) Japanese Standards Association ed., *JIS Handbook Piping*, (2009), Japanese Standards Association.