

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*

増田 宏^{*1}

A Solid Modeling System for Large-Scale Point-Clouds Using Image-Based Interface

Hiroshi MASUDA^{*2}

^{*2} The University of Tokyo Dept. of Systems Innovation
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

Mid-range and long-range laser scanners are capture dense point-clouds from engineering facilities. The captured point-clouds can be converted to smooth mesh models by using streaming operations. In this paper, we discuss a solid modeling system based on large-scale mesh models. When an engineering facility is measured by a laser scanner, components are scanned only from the limited directions, and they may be partially occluded by other components. To construct solid models using such incomplete mesh models, we introduce modeling and editing operations based on the reflectance images, which can be generated from point-clouds. We also show how to generate 3D models of standard parts.

Key Words : Point-Based Modeling, Image-Based Modeling, Interactive Modeling

1. 結 言

大型設備は長寿命であるため、メンテナンスや改修が不可欠である。メンテナンス作業では、機材等の搬入経路の確保や他部品との干渉を回避することが要求されるが、現状では、現場での作業の手戻りなどにより時間とコストの無駄が発生している。もし設備の3D CAD モデルが存在すれば、計算機シミュレーションにより、手戻りのない効率的な作業手順が生成できる。しかし、メンテナンスを必要とする設備は古いことが多く、ほとんどの場合に CAD モデルが存在しない。また、現場合わせの作業慣行や度重なる改修のために、図面と現物が一致しない状況も多く発生している。そのため、現物を計測して CAD モデルを作成するアズ・ビルトモデリングが強く求められている。

一方で、近年では大型設備の計測ができるレーザスキャナが急速に進歩し、短時間で大量の点群を取得できるようになっている。そのため、大規模設備を計測して現物の CAD モデルを作成し、シミュレーション等に利用することが可能な状況になってきた。

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ー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、時間とコストのかかる作業が必要となる。

そのため、設備のモデリングでは、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、点群は複雑に分断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、別にとった写真を参照したり、現場に精通していることが必要となる。

本研究では、こうした問題に対処するために、メッシュ処理とフォトグラメトリを融合させた新しいモデリング方法論を提案する。

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。作業の手間にかかるが、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) のメッシュモデルでは、計算機処理が行いやすい反面、点群が不完全な場合には、人が直感的に理解できないという問題がある。

*原稿受付 0000 年 00 月 00 日

^{*1} 正員, 東京大学 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: masuda@sys.t.u-tokyo.ac.jp

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、点群データをメッシュモデルに変換し、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調的にモデリング作業を行える環境を実現する。また、その実装を行うことで、容易に3Dモデリングが行えることを示す。

基本的なアイデアは、近年の位相差方式レーザスキャナが非常に細密な点群を計測できることに基づいている。高性能の計測装置では、4分弱で全周囲から約5000万点を取得できる⁽¹⁾。各計測点はレーザ反射強度を持つので、そ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、画像上でのモデリングに適した透視投影画像の合成も可能である。本研究では、画像と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可能にするが、このようなモデリング手法はこれまで提案されていなかった。

なお、本研究では、一回のレーザスキャンで得られた点群が個別に処理される。複数箇所から計測された場合には、通常、いくつかの対象物に貼られたターゲットを用いて基準座標系への変換行列が計算される。大規模点群では、この変換行列をファイルのヘッダとし、レーザ光源を原点とする座標を記述したファイル形式も多く用いられる。本研究では、そのような点群ファイルを用いており、点群ファイルごとに変換行列が記述されている。そのため、本手法で作成されたソリッドモデルは、複数箇所から計測されたものであっても、座標変換を施すことで、単一の基準座標系での表示が可能である。

不完全な点群を用いた大規模対象物のモデリングの先行研究では、Chenら⁽²⁾が、建築物の多面体モデルの生成を行った。しかし、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⁽³⁾は、木の生成規則を知識として、点群を用いた樹木のモデル生成を行ったが、現物に忠実な形状は再現されていない。これらは本手法の提案とは基本的なアプローチが異なっている。

本論文では、2章でレーザ反射強度から明暗画像を作成する方法を示し、3章で画像インタフェースを介したモデリング手法を示す。4章では、画像インタフェースに基づくフィーチャモデリング手法を示す。

2. 点群からの画像の生成

2・1 球面投影による画像 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。また、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。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。本研究では、球面上に投影された画像を球面画像と呼ぶことにする。

2・2 メルカトル図法による画像 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

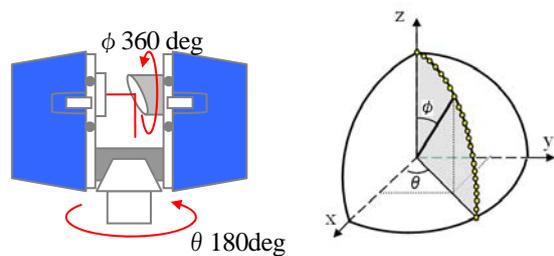


(a) Mesh model generated from point-cloud



(b) Digital image generated from point-cloud

Fig. 1 Mesh model and digital image



(a) Laser scanner

(b) Spherical coordinate

Fig. 2 Laser scanner and coordinate system



Fig. 3 Spherical image

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。

2・3 透視投影による画像 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、ユーザがこの画像を用いて部品を認識したり、画像上にスケッチしたりする目的には適していない。

3次元空間の直線を平面上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。

3. 画像インタフェース

3・1 画像と点群との関連付け 大規模点群を処理して得られた平滑なメッシュモデルを考える。平滑化とメッシュ生成には、我々が提案したロバスト推定⁽⁴⁾とストリーミング手法⁽⁵⁾を用いている。

ここでは、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、画像をインタフェースとして用いることを考える。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矩形領域は、メッシュモデルの一部を切り取ることができる。ここではこの関係を利用する。

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では実メモリでの処理が難しく、また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。

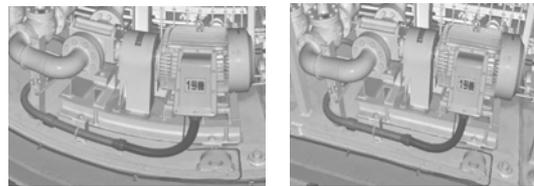
そこで、メッシュデータは実メモリに展開せずにハードディスク上に保持し、必要な部分だけを適宜読み込む方法を用いる。大規模メッシュをハードディスクから読み込みながら逐次処理する方法として、ストリーミングメッシュ⁽⁶⁾が知られているが、メッ

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



Fig. 4 Mercator image



(a) Mercator image (b) Perspective image

Fig. 5 Sample of perspective projection

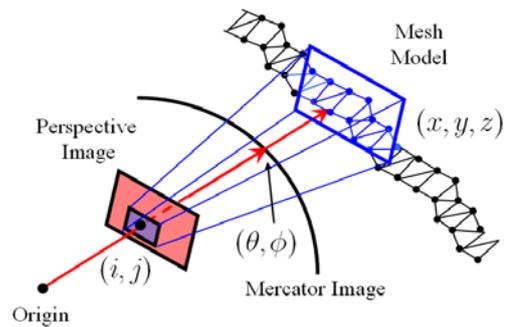


Fig. 6 Perspective projection

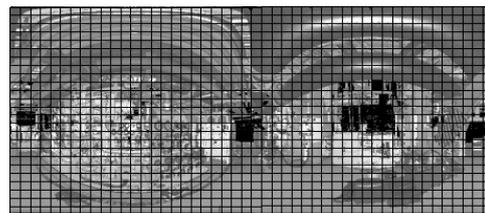


Fig. 7 Lattice structure of mesh model

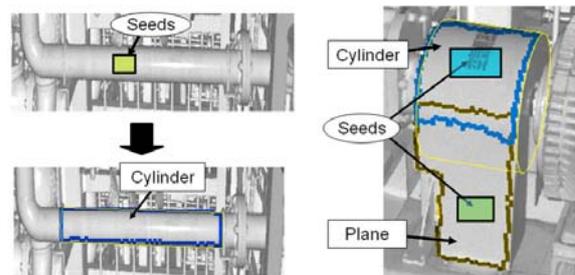


Fig. 8 Surface extraction

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リスト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。その際、頂点に隣接する他の頂点のリストをセル番号と頂点番号を用いて記述する。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通常のPCで処理することができる。

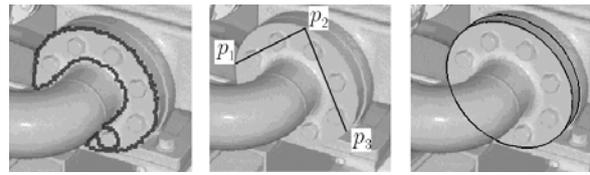
3.2 曲面情報の抽出 このデータ構造を用いて、大規模メッシュから曲面領域の抽出を行う。曲面抽出は、メッシュ処理でよく用いられる領域成長法を用いて、以下の手順で行う。

- (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。

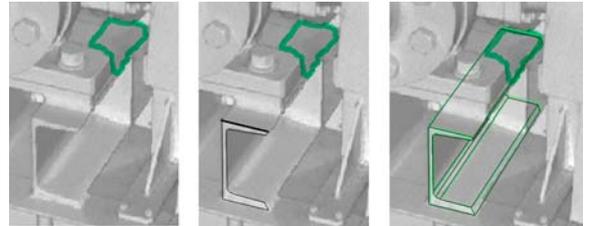
4. 画像インタフェースによるモデリング

4.1 画像上でのスケッチによるモデリング 図8から明らかなように、メッシュモデルから抽出された曲面領域の境界は正確ではない。この理由は、面の境界部ではレーザー光が分断されて座標が異常値として計測されることが多いため、座標値の平滑化を行う過程で異常値の多い境界部の点が除去されてしまうためである。一般



(a) Plane detection (b) Sketch (c) 3D model

Fig. 9 Sketch on a plane



(a) Plane detection (b) Sketch (c) 3D model

Fig. 10 Sketch on the perpendicular plane.

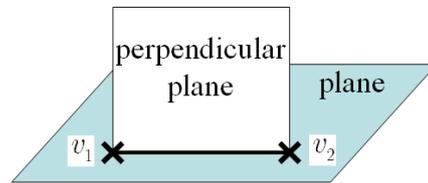


Fig. 11 Sketch on the perpendicular plane

に、点群計測では、曲面式は比較的正確に求まるが、境界エッジの情報は正確に求められないことが多い。

この問題に対処するために、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3次元空間に作成できる。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、もし、点がある曲面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ことができる。マウスを点 p_3 から高さ方向に点 p_4 までドラッグするとき、点 v_3 を通り平面 P に垂直な直線 L を考えると、直線 L との距離が最短で、かつ点 p_4 に投影される3次元座標 v_4 が計算できる。 v_3 と v_4 の距離を高さとして用いることで円柱のソリッドモデルが作成できる(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きる。従って、図 10(b)の太線で示したように、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))。

4・2 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。この性質を用いて、ソリッドモデルのスイープ、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。なお、ここでは、ソリッドモデルの各面が画像上で選択できるようになっている。

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、ソリッドモデルが平面上を平行移動する。

これらの操作は、曲面抽出で得られたソリッドモデルを画像に合うように編集するために有効である。また、繰り返し現れる部品を作成する手間を軽減できる。

5. フィーチャモデリング

5・1 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。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れば、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。

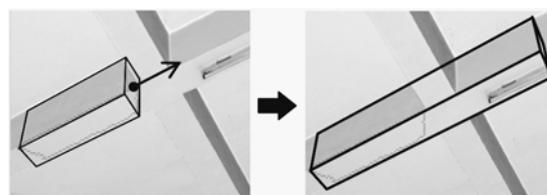
図 13 に配管のモデリングの例を示す。ユーザは配管フィーチャを選択してから、曲面抽出を行う。それによって、図 13(a) に示す円柱領域が抽出される。ただし、配管の寸法は規格に定められており、配管の径は離散的な値しか取ることができない。

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

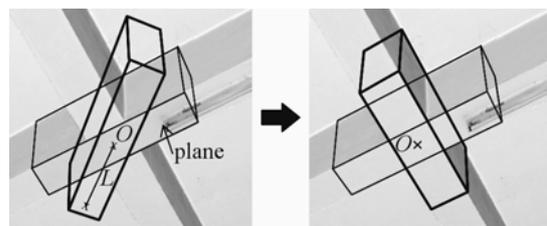
規格表から選択するものとする。その後、規格寸法を既知として曲面式を再計算して計算精度を向上させる。

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。

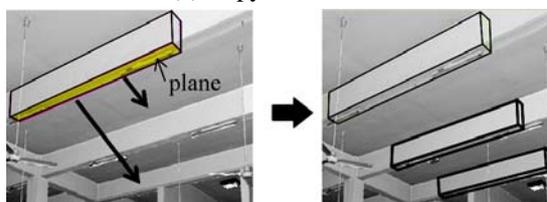
なお、他の部品で一部が隠されている場合、配管全体は抽出できない。この例では、配管を固定するための部品が配管を遮っているため、領域成長法では配管の一部領域しか抽出できない。そこで、前章で述べたスイープ



(a) Sweep

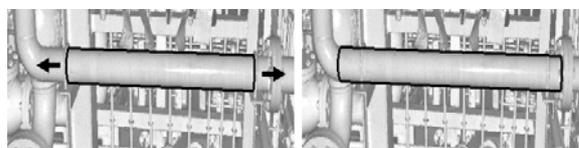


(b) Copy and rotation



(c) Copy and drag

Fig.12 Editing operations



(a) Cylinder surface (b) Pipe feature

Fig. 13 Generation of pipe feature

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	
	2.5		outside diameter

Fig. 14 JIS standard of pipe

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))。

5.2 規格部品フィーチャ 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、妥当なパラメータを容易に選択できる。

そこで、図15に示す部品に関して、接続する配管を指定することでフィーチャモデリングを行う操作を実現した。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モデリングを行うことが可能となっている。

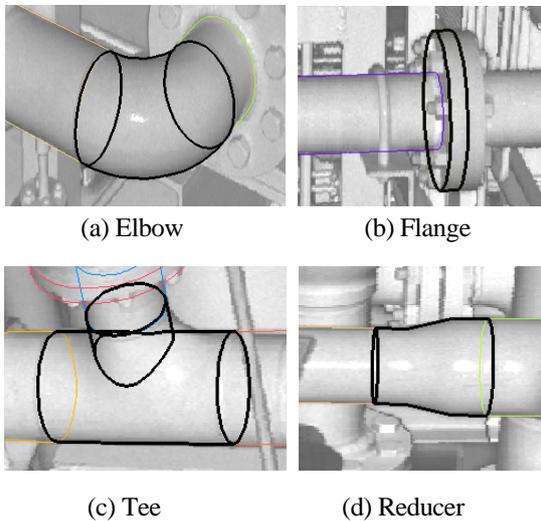


Fig. 15 Solid models of standard parts

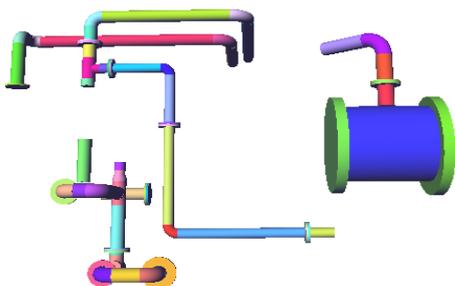


Fig. 16 Generated solid models

5.3 フィーチャモデリングの例 本研究では、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ている。作成されたソリッドモデルは、図15で示したようなワイヤフレーム表示のほか、図16のような陰面表示も行うことができる。

6. 結 語

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。

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、他の規格部品やバルブなどのフィーチャを実装する必要がある。また、非規格品に対応するために、ユーザが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、規格品フィーチャについては自動認識できることが望ましい。今後は、これらの課題について取り組む予定である。

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) Masuda, H. and Murakami, K., A Study on Smooth Surface Reconstruction from Large-Scale Noisy Point-Clouds: Smoothing Operators Based on Robust Estimate, *Journal of The Japan Society for Precision Engineering*, Vol.76, No.5 (2010), pp. 582-586.
- (5) Masuda, H. and Murakami, K., A Study on Smooth Surface Reconstruction from Large-Scale Noisy Point-Clouds: Streaming Processing for Large-Scale Point-Clouds, *Journal of The Japan Society for Precision Engineering*, Vol.76, No.6 (2010), pp.689-693.
- (6) Isenburg, M. and Lindstrom, P., Streaming mesh, *Proceeding of Visualization'05*, (2005), pp. 231-238.
- (7) Japanese Standards Association ed., *JIS Handbook Piping*, (2009), Japanese Standards Association.

