

タイトルカットが入ります

# レーザ計測データに基づく形状再構成技術

正会員 増田 宏\*1

## 1. はじめに

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、大型構造物、市街地、生産設備、交通網などを計測して、実物に即した3次元モデリングを行う手法が検討されるようになってきた。

大型構造物や設備の迅速な現況把握と改修・更新は多くの企業において重要な課題となっている。そうした作業を短期間・低コストで行うためには、アズビルトモデリングが有効である。アズビルトモデリングとは、既存の大型設備の3次元計測に基づいて3次元CADデータを作成する技術の総称である。モデルベースで作業工程、干渉、改修部品の検討を行った後に実作業を行えば、作業が短期間で確実に進め、設備の停止期間も短縮することができる。

しかしながら、レーザスキャナを利用した工業設備の3次元形状再構成は容易ではなく、以下のような問題が存在する。

(1) 膨大な点群：最近の位相差方式レーザスキャナでは、数千万の点群を数分で取得できる。複数回計測した点群を併合するため、点の個数が数億点になることも普通である。この規模の点群処理を効率的に行う手法が求められている。

(2) 異常値処理：レーザ計測によって得られたデータには、異常値が混入している。異常値とは、正規分布から大きく離れた誤差を持つ計測データである。特に物体の境界付近でレーザのスポット光が分断されたときに異常値が大量に発生し、物体が存在しない部分にも点群が観測される現象が発生する。データ処理においては、異常値の影響を受けにくい手法が必要となる。

(3) 不完全なデータ：大型設備は多数の部材によって構成されている。そのため、他の部材に隠され

て部分的に欠落した点群データしか得られないことも一般的であり、そうした不完全なデータに対応できる手法が必要となる。

(4) 応用分野の多様性：レーザ計測が活用できる業界は広いが、業界ごとにニーズが異なっている。機械設計支援、コンピュータグラフィックス、ロボットの視覚認識、測量の分野では、レーザ計測データの処理技術の蓄積が豊富であり、独自のニーズに対応できるが、それ以外の新しい応用領域に関しては十分なスキルが乏しいのが実情である。工業的な応用をカバーできる包括的な技術基盤の確立や人材育成が必要である。

本稿では、こうした状況も踏まえながら、レーザ計測データを用いた形状再構成について解説する。

## 2. レーザ計測データの特徴

一回のレーザ計測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ている。レーザスキャナでは、図1に示すように、方位角と仰角によってレーザの照射方向が決められる。座標は照射方向と対象物までの距離によって計算される。

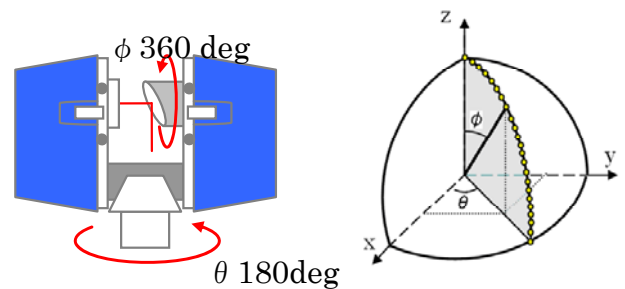


図1 レーザスキャナと球面座標系

また、計測時に座標とともにレーザ反射強度が得られる。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2は、照射されたレーザの照射方向の反射強度を球面上に表示したものである。

\*1 所属 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻  
\*2 所属

点群全体を概観するために、球面を平面に展開するメルカトル図法(図3)が多くの点群処理システムで標準的に用いられている。ただし、メルカトル図法は全方位を表示するには適しているが、極に近づくほど大きく歪む。メルカトル図を透視投影図に変換すれば自然な画像が得られるが、描画できる範囲は限定される(図4)。これら二通りの描画方法は、状況に応じて使い分けられる。

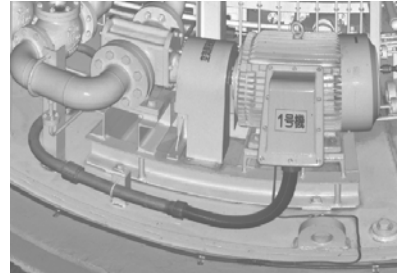
すなわち、中・長距離のレーザ計測で取得された点群は、図3に示した画像の画素に対応付けて保持できる。このような整列した点群を距離画像と呼ぶ。距離画像では、整列していない点群の処理よりも処理が単純化できることが多いが、工業設備の特有の問題もあり、技術の普及のためには解決すべき問題が多い。



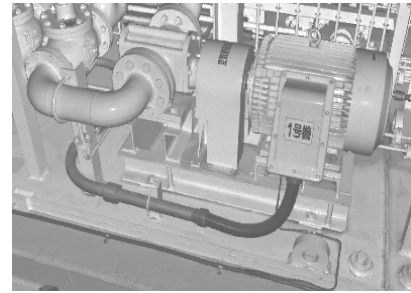
図2 球面に投影された画像



図3 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

図4 透視投影画像への変換

### 3. 曲面抽出

大型構造物や工業設備では、平面や円柱など単純な面から構成される規格品が多い。そのため、形状再構成においては、幾何曲面の算出が重要である。

#### 3.1 曲面フィッティング

多数の点の座標が与えられたときに、それらに当てはまる曲面式を求める問題を考える。たとえば、点群がある平面上に乗っているとする。平面式を  $ax+by+cz-d=0$  (ただし、 $a^2+b^2+c^2=1$ ) とすると、平面計算では係数  $a, b, c, d$  の値が算出できればよい。

簡単に考えると、最小2乗法を用いて、残差の2乗和

$$\sum (ax_i + by_i + cz_i - d)^2 \quad (1)$$

を最小化すればよいように思えるが、実際の計測点による計算では、正しく求まらないことがしばしばある。これは、レーザ計測で得られた点群に異常値が含まれるためである。最小2乗法は、異常値に弱いことが知られている。残差の大きい異常値を2乗すると、その値が全体に大きな影響を与えるからである。この問題に対処するためには、前処理として異常値を除去するか、異常値に影響されにくいロバスト推定を用いる必要がある。

ロバスト推定では、ローレンツ分布やTukeyバイウエイット法などが知られている。たとえば、ローレンツ分布に基づく方法では、式(1)の代わりに

$$\sum \log \{1 + (ax_i + by_i + cz_i - d)^2\} \quad (2)$$

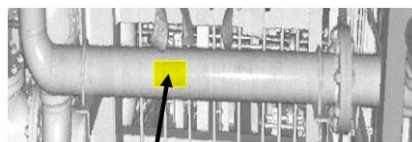
を最小化する。式(1)も式(2)も残差を小さくする解を算出することになり、似たような解になるように見える。しかし、式(2)では異常値の寄与が小さくなり、実質的に異常値の影響をほとんど受けない。異常値が除去できないときは、こうしたロバスト推定を用いる必要がある。

工業設備の点群においては、平面、球面、円柱、円錐、トーラスが多く出現する。これらの曲面に関しても、点 $(x_i, y_i, z_i)$ の残差が計算できれば、式(1)または(2)を用いて曲面式を計算できる。これらの曲面式の計算法については、参考文献[1]に詳しく示されている。

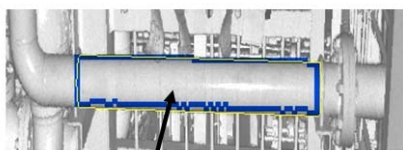
### 3.2 領域成長法

領域成長法は、点群データから、ある曲面式を満たす領域を検出するための手法である。

図5に領域成長法の例を示す。まず、ユーザの選択等によって適当な点群を選び、シード領域とする。また、シード領域の点を用いて、曲面式の計算を行う。次に、シード領域の近くにある点を調べ、それらが曲面上に乗っていれば、領域に加えて範囲を拡張する。この処理が点が追加できなくなるまで続ける。その結果、図5に示すような円柱領域や平面領域が検出できる。



シード領域



検出領域

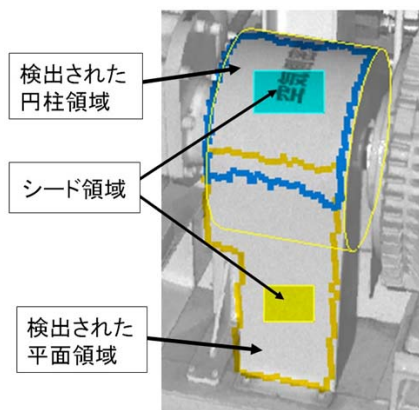


図5 領域成長法による曲面抽出

なお、領域成長法は高速であるが、大きなノイズがあると領域が十分に成長しない。そのため、ノイズが大きい場合には事前に文献[2]に示すような平滑化処理が必要となる。

### 3.3 RANSAC法

点群からの幾何曲面検出には、RANSAC法もよく用いられる。この手法は、点群にさまざまな曲面が混在するときに有効である。

ここでは、 $N$ 個の点群から未知の平面を見つけ出す問題を考える。RANSAC法では、平面は以下の手順で計算される。

(1) 平面は3点あれば一意に確定するので、 $N$ 個の点から3個をランダムに取って、その3点から平面式を計算する。

(2)  $N$ 個の点のうち、(1)で計算された平面からの距離が閾値 $\delta$ 以内の点の個数を数える。

(3) 上記の(1)(2)の手順を多数回繰り返す。点の個数が最も多くなる平面式を採用する。

平面以外の曲面式についても同様で、少数の点から曲面式を計算し、点が最も多く乗っている曲面式を採用することで曲面抽出が行える[3]。

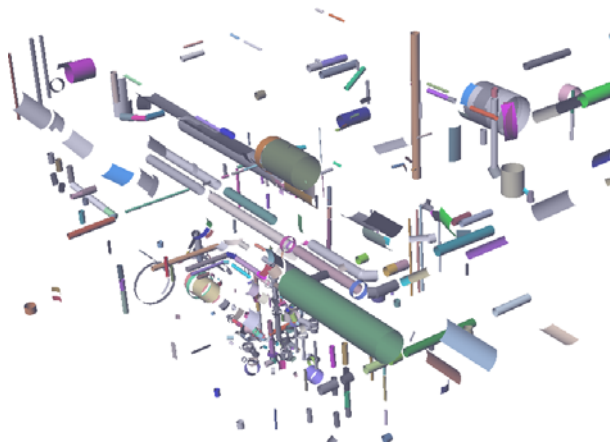
なお、RANSAC法は、異常値の多い点群からでも幾何曲面が検出できるという利点がある。しかし、大規模点群にそのまま適用すると、十分な確率で曲面検出を行うのに非常に多くの試行が必要となり、実用的な時間で解が算出できないという問題が起こる。RANSAC法を適切に用いるには、全体を小領域に分割するなど、試行回数を少なくするための工夫が必須である。

### 3.2. 曲面の自動検出

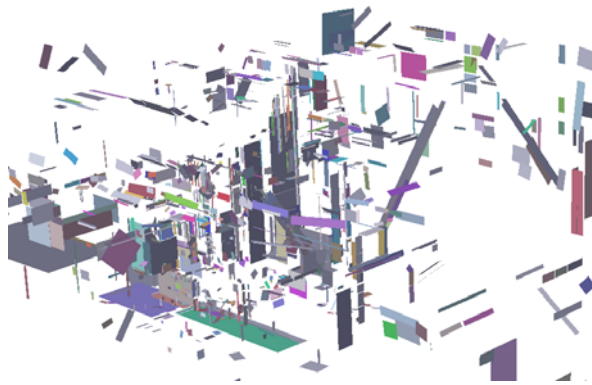
点群から曲面を自動的に抽出する問題においては、領域成長法、RANSAC法のどちらの方法も用いられている。

領域成長法では、シード領域をランダムに選択し、十分大きな領域に成長したらそれを解とする。RANSAC法では、全体を適当な大きさの領域に分割し、それぞれに対してランダムサンプリングにより曲面式を求める。

図6に発電プラントを計測した約5000万点から、円柱と平面を自動抽出した例を示す。約1500個の平面と500個の円柱が抽出できている。我々のシステムでは、計算時間は15分程度であった。



(a) 円柱の抽出



(b) 平面の抽出

図6. 曲面自動抽出

## 4. インタラクティブモデリング

### 4.1 インタラクティブ処理の必要性

自動抽出によってある程度の曲面抽出は行えるが、未検出や誤検出が避けられない。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は欠落が起こる。その場合、図7のように、面が複雑に分断されるので、これらを統合して元の形状を復元しなければならない。

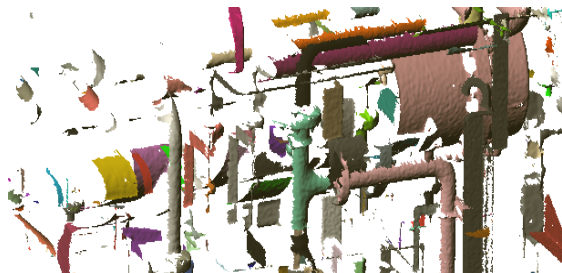


図7 分断された曲面

形状再構成を確実に行うには、自動処理では限界がある。人が指示しながら形状モデリングを行わなければならない部分が残るため、人と計算機が強調しながら操作できる環境が必要となる。

そこで、我々は、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構築した[4]。このシステムでは、3次元の点群と2次元のデジタル画像を関連付ける。それにより、作業者が画像を確認しながら、直感的に操作できるようにする。ここでは、このシステムについて紹介する。

### 4.2 画像上でのスケッチによるモデリング

点群処理においては、曲面式は比較的正確に求まるが、境界エッジを正確に求めることは難しい。境界付近では、レーザ光のスポット割れが生じやすく、データが不安定になるためである。

この問題に対処するために、境界の自動抽出はあきらめて、ユーザが画像上にスケッチすることで、曲面領域を指定することを考える。

図8は、点群、メルカトル画像、透視投影画像の関係を示している。この図より、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と曲面との交点から座標が一意に決まることがわかる。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。

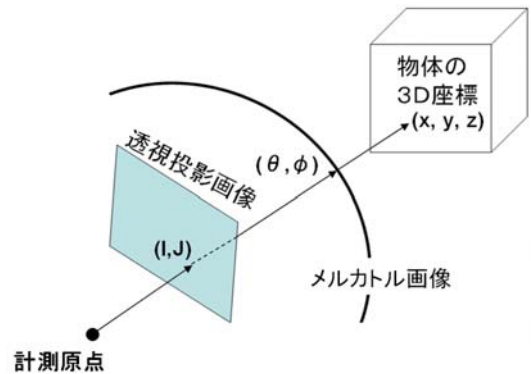
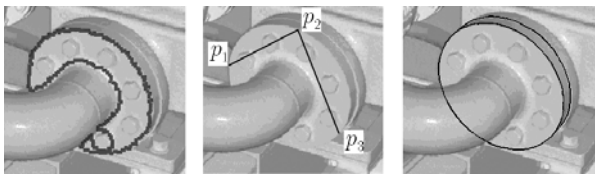
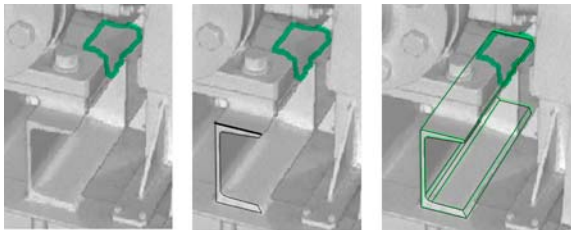


図8 画像と点群の対応



平面抽出      スケッチ      形状再構成  
(a) 円柱形状の再構成



平面抽出      スケッチ      形状再構成  
(b) 多角柱形状の再構成

図9 画面上でのスケッチによる形状再構成

図9(a)は、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、円柱上面の平面の方程式を領域成長法で算出する。次に、ユーザが画像上で円弧上の3点を指定する。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(b)は、断面をスケッチにより指定して、鋼材の形状を再構成した例である。

#### 4.3 フィーチャモデリング

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。

このように、部材の種類をユーザが特定した上でモデリングを行う手法をフィーチャモデリングと呼ぶ。フィーチャモデリングでは、規格などの付随的な情報も利用しながら形状を決定する。

図10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。また、画像に合わせて、円柱の長さを調整する。

このとき、配管の寸法は規格に定められているので、配管の径は離散的な値しか取ることができない。そのよ

うな場合には、得られた曲面に最も近い寸法値を規格表から選択して、その値になるように円柱を再計算する。

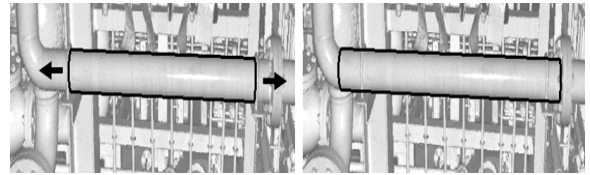


図10 配管フィーチャの作成

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	
2.5			outside diameter

図11 配管のJIS規格表

JIS規格では、一般構造用炭素鋼鋼管が図11のように規定されており、この表を参照すれば、図10の円柱の場合には、最も近い値として89.1mmが選択される。円柱の未知数は5個であるが、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。

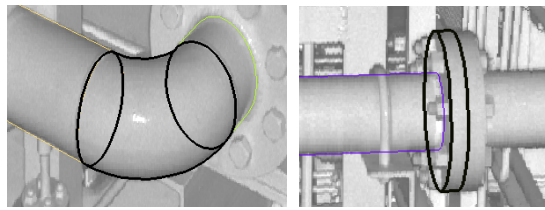
設備のモデリングでは、部材の接続関係から形状が決定する場合も多い。図12そのような部材を示している。これらのエルボ、フランジ、突合せ、レジャーサでは、接続する配管の径が決まれば寸法が確定する。したがって、これらの部材については、接続する配管を指定すれば自動的に形状が決められる。

我々のシステムでは、断面スケッチからの形状再構成と、規格部品のためのフィーチャが用意されている。図13は、それらを用いてモデリングを行った例である。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。

#### 4. おわりに

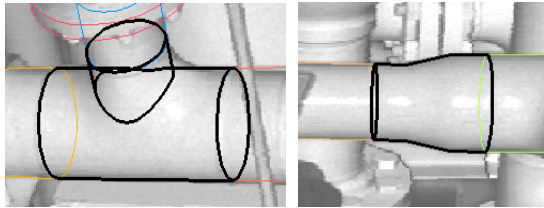
本稿では、レーザ計測データに基づく形状再構成について解説を行った。レーザ計測装置が安価になってきたせいもあると思われるが、最近になって興味を持つ企業が増えてきている。

筆者は、大規模構造物や設備の形状再構成技術の研究を行っており、また「サイバーフィールド構築技術研究分科会」を運営して産業界への啓蒙活動を行ってきた。2012年3月からは、規模を拡大して、「大規模環境の3次元計測と認識モデル化技術専門委員会」へと改組する。興味を持たれた方は、HPを参照いただければ幸いです。



(a) エルボ

(b) フランジ



(c) ティー

(d) レジューサ

図12 規格部品の形状再構成

- 2) 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.
- 3) Schnabel, R.; Wahl, R.; Klein, R.: Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection, Computer Graphics Forum, 26(2), 2007, 214-226.
- 4) 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巻771号C編, pp.2748-2752, 2010.

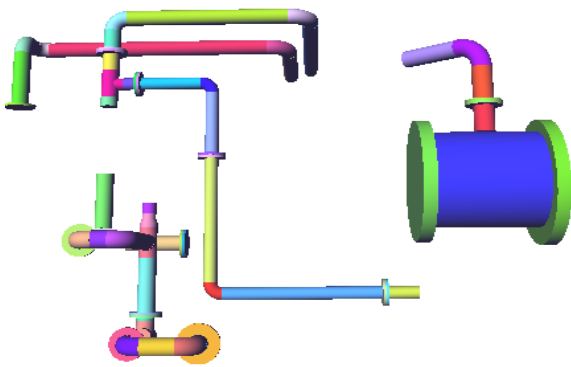
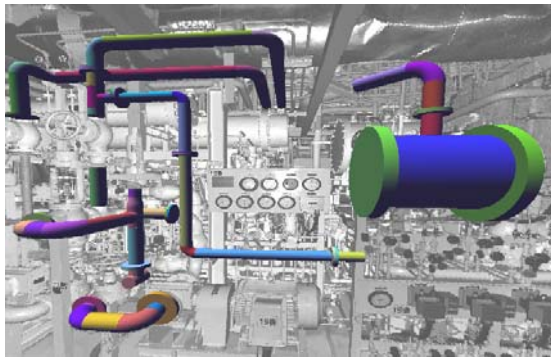


図13 配管の形状再構成

### 参考文献

- 1) Lukacs, G.; Marshall, A.D.; Martin, R.R.: Faithful least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori for reliable segmentation. Proceedings, 5th European Conference on Computer Vision, pp. 671-686, 1998.