

# 大規模点群からの生産設備の形状再構成(第2報)\*

—複数の点群データからの整合的な部材形状の再構成—

松岡 諒\*\* 増田 宏\*\*\*

Reconstruction of Structure Shapes in Facilities from Large-Scale Point Cloud (2nd report)  
- Consistent Shape Reconstruction from Multiple Point-Clouds -

Ryo MATSUOKA and Hiroshi MASUDA

Dense point-clouds of engineering facilities can be captured using terrestrial laser scanners. It is important for many engineering applications to generate 3D models of components in facilities from captured point-clouds. In our previous work, we proposed a method for reconstructing pipe structures from a single incomplete point-cloud. In this paper, we extend this method for reconstructing consistent models using multiple point-clouds captured at different positions. In our method, pipe models are generated from each point-cloud and overlapping pipes are merged into unified pipes. Then we estimate other connecting parts on the basis of pipe models. Since point-clouds of facilities include a lot of occluded portions, multiple candidates of connecting parts are often generated. For solving this problem, we introduce visibility checks from multiple positions and select a consistent set of part models. We also discuss how to evaluate reliability of generated models.

**Key words:** point-cloud, laser scanner, 3D modeling, shape reconstruction

## 1. 緒言

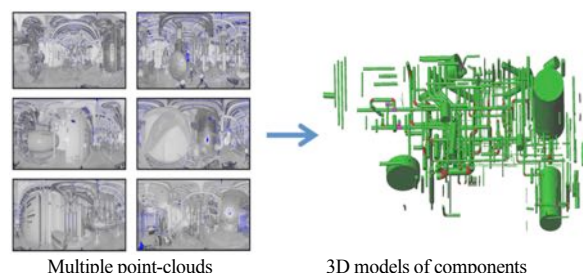
近年のレーザスキャナの性能の向上に伴い、3次元計測によって取得したデータから、大規模環境の3次元形状を再構成するための手法へのニーズが高まっている。現物の設備の計測に基づいた形状モデルが生成できれば、現状を適切に反映したモデルに基づいて、改修やメンテナンスなどのシミュレーションが行える。その際、計測データから可能な限り自動的にモデルを生成することが出来れば、従来必要であった人手とコストを削減することができる。

一般に、工場やプラント内部には配管などの部材が密に配置されており、計測位置が制約を受けることが多い。そのため、全方位から計測された点群データを得ることは望めず、不完全な点群データからでも、できるだけ多くの部材の位置や寸法が計算できることが求められる。

第1報においては、一カ所から計測された単一の点群データから、パイプ、エルボ、ティー、フランジ等の配管システム部材の形状を再構成するための手法について提案した<sup>1)</sup>。この研究においては、大規模点群データを高速に処理し、不完全な計測データからでも接続部材の推定と検証を行なうことで形状再構成を行える手法を示した。

一方で、現実の計測では、全方位からの計測が難しい場合でも、限られた複数地点から計測できるケースも多い。そのような場合には、計測データは依然として不完全であるものの、複数地点からの計測データを用いることで形状再構成の再現率や適合率が向上できることが期待できる。

本研究では、第1報で提案した手法を拡張し、**図1**のように



**Fig.1** Shape reconstruction from multiple point-clouds

設備を複数地点から計測したデータを用いて、計測データに矛盾しない整合的な部材モデルを再構成する手法を提案する。また、個々の部材について信頼度を定義し、信頼度が低い部材をユーザに通知して確認を促す仕組みについても考える。

以下、第2章では提案手法の概要について示し、第3章では部材モデルを統合する手法を示す。第4章では複数視点からの適合度評価と部材モデルの信頼度評価について論じる。第5章では実データを用いた検証実験について示す。

## 2. 手法の概要

本研究で提案する形状再構成手法の流れを**図2**に示す。また、主要な処理の概念図を**図3**に示す。

まず、第1報で提案した手法を用いて、各地点で計測された点群からパイプ形状を再構成する。この手法では、**図3(a)**のような点群データをレーザ光源が原点となる球面座標で記述し、緯度・経度を主軸とする**図3(b)**に示すような2次元平面に投影する。測量用のレーザスキャナでは、緯度と経度に関して等角度でレーザ照射角度を変化させて計測を行うので、緯度と経度を主軸とする平面座標系では、点は格子上に並ぶ。本稿では格子点が3次元座標を持つ2次元配列を距離画像と呼ぶ。

次に、距離画像上での隣接関係を調べて平面領域と円柱領域

\* 原稿受付 平成26年4月21日

掲載決定 平成26年7月25日

\*\* 学生会員 東京大学大学院(東京都文京区本郷7丁目3番)

\*\*\* 正会員 電気通信大学大学院(東京都調布市布ヶ丘1-5-1)

を検出する。図 3(c) は検出された円柱を示したものである。このとき、各曲面に乗っている点のリストを、後の結合処理のために保持しておく。

ここから複数の点群データが得られていることに基づく処理を行っていく。まず、個々の点群において、検出された円柱を結合して、パイプモデルを作成する。このとき、図 3(d) に示すように、円柱の軸が同一直線上に近接して存在し、半径がほぼ等しいならば、結合の候補とする。そして、図 3(e) に示すように、複数の計測地点からの可視性をチェックして矛盾がないかを調べ、矛盾がなければ円柱を結合して単一のパイプモデルとする。その際、どの円柱を結合したかを記録しておく。

次に、個々の点群データで作成されたパイプモデルを統合する。その際、図 3(f) に示すように、パイプの一部がオーバーラップする場合には、それらを統合して単一のパイプとする。パイプの統合においては、複数の円柱上に乗っていた点群から円柱の方程式を再計算して計算精度を向上させる。

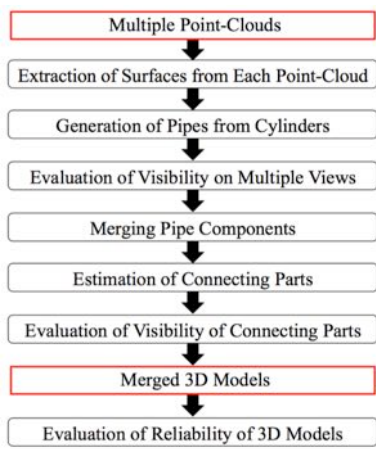


Fig. 2 Process of shape reconstruction

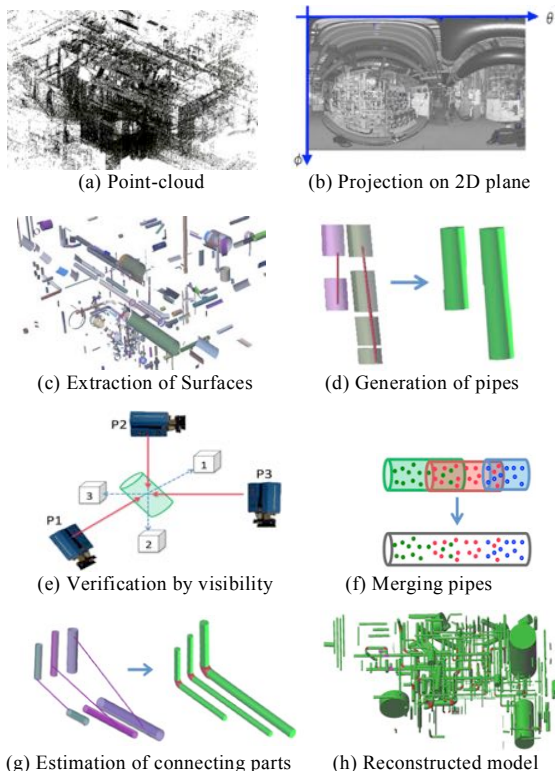


Fig. 3 Overview of shape reconstruction process

パイプが再構成されたら、それらの位置関係を調べる。例えば図 3(g) のように、ほぼ垂直に交差するならば、エルボの存在を推定する。本研究では、接合部材として、エルボ、ティー、フランジを考える。これらの接合部材は、図 3(e) の可視性チェックで計測データとの適合性が判定され、矛盾がなければ部材モデルが生成される。最終的に、図 3(h) に示すような 3D モデルが生成される。また、生成された部材モデルについては、部材モデルに乗っている点群の比率に基づいて信頼度評価を行い、信頼度が低い場合にはユーザに通知する。

### 3. 複数の点群から生成された形状モデルの統合

#### 3.1 座標変換

レーザスキャナで計測された点群データは、レーザ光源を原点とする座標系で出力される。そのため、複数の点群データを統合する際には、レジストレーションを行い、世界座標系に変換するための変換行列を計算する。なお、本研究で用いた点群においては、計測の際にマーカを設置し、市販ソフトウェアによってレジストレーションを行った。

図 4 の例では、2 個の点群データは固有のスキャナ座標系で座標が記述されており、またレジストレーションによって変換行列  $M_1$ ,  $M_2$  が付加されている。この変換行列を用いることでスキャナ座標系の座標を世界座標系に変換できる。また、逆行列を施せば、世界座標系の座標をスキャナ座標系に基づいた距離画像上に投影できる。

#### 3.2 円柱の統合によるパイプモデルの生成

前報<sup>1)</sup>では、距離画像上での隣接関係を用いて、高速に円柱を検出する方法を提案した。本研究においても同様の手法で円柱面を抽出する。ただし、検出された円柱面は、円柱上の点群と対応を付けておくものとする。

パイプの計測データは、他の部材に遮られることが多く、その場合は、断片的な円柱面の集合として得られる。そこで、図 5 に示すように、軸を共有し、半径が等しい円柱面をグループ化してパイプ部材を生成する。距離画像上の各点は円柱と対応付けられているので、距離画像上での距離が近い円柱のみをグループ化の候補とする。また、パイプの径は規格によって決まっているので、JIS 等の規格表で十分近い半径があれば、円柱の半径を規格値に置き換える。

ただし、非連結の円柱面を統合するときには、誤って別のパイプを連結してしまう恐れがある。この問題を避ける

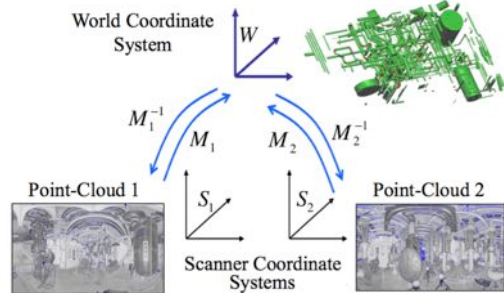


Fig. 4 Transformation of coordinates on scanner coordinate system

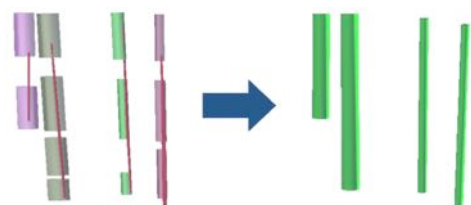


Fig. 5 Generation of pipe models by connecting cylinders

ために、次章で示す複数視点からの適合度判定を行い、矛盾と判定された場合には円柱面を統合せずに別のパイプモデルとして扱う。

### 3.3 複数点群のパイプモデルの統合

次に、複数の点群データから抽出されたパイプを統合する。ここで、パイプモデルは1個以上の円柱と対応付けられており、円柱は点群と対応付けられている。また、それぞれの点群は世界座標系に変換するための変換行列を保持しているものとする。このとき、パイプの統合を図6に示す手順で行う。まず、世界座標系で記述された円柱の重複を調べていき、以下の条件を満たすときに、パイプの統合の候補とする。

- (1) 二つのパイプの一部に重なりがある。
- (2) 円柱の軸の角度が $\theta_m$ 以下。
- (3) 円柱の半径が等しい。

本研究では、 $\theta_m = 10$  [deg]とした。各パイプには、スキャナ座標系の点群が対応付けられているので、これら世界座標系に変換し、複数のパイプ上の点群を統合して円柱を再計算する。この計算では、Schnabel<sup>29</sup>らが示したRANSAC法による円柱計算の結果を初期値として用いて、Lukacs<sup>30</sup>らの提案した非線形の最小二乗法による円柱計算を行うことで計算精度を高めている。なお、本研究では、候補の検出をすべての円柱の組合せに対して行っているが、円柱の個数が多い場合には、ボクセルを用いて、中心軸の共通部分の検出を高速化することも可能である。

### 3.4 接続部材モデルの生成

次に、算出されたパイプの形状と位置関係に基づいて接続部材を推定する。ここでは、図7に示すようなエルボ、ティー、フランジについて考える。これらはパイプを接続する目的で使用され、規格によって寸法が規定されている。ここでは、パイプがある条件を満たすときに、エルボ、ティー、フランジが存在する可能性があると考える。推定された接続部材は、次章で述べる適合度評価をパスした段階で、部材モデルとして生成される。

エルボは2個のパイプを45度または90度で接続する用途で用いられる部材である。90度で接続する場合、二つの円柱の軸がほぼ直交し、2軸の交点が円柱の外部に存在する。エルボの形状と位置は、パイプの軸と半径から決定される。

ティーは3個のパイプをT字型に接続する用途で用いられる。直交する2個の円柱軸の交点が一方の円柱の内部に存在するとき、ティーが存在するものと仮定する。

フランジは同軸同径のパイプを接続する用途で用いられる。フランジは長さの短い円柱であり、レーザ照射角度に応じて、平面もしくは円柱が検出される。円柱が検出された場合は同軸上の円柱として、平面が検出された場合は円柱と平面の位置関係に基づいてフランジの推定を行う。

## 4. 推定された部材モデルの適合度評価と信頼性評価

### 4.1 複数視点からの適合度評価

本手法では、パイプの径と位置から接続部材を推定しているが、誤った接続部材が生成されてしまう可能性がある。前報<sup>31</sup>においては、一カ所から計測された単一の点群データに関して、接続部材が存在することで矛盾が生じるかどうかを判定する方法を示した。本研究においては、この方法を複数の点群データに拡張する。

図8に基本的な考え方を示す。この例では、3カ所から部材が計測され、図に示す円柱の部材の存在が推定されたものとする。もし、この部材が存在するならば、P1の地点で計測されたとき、立体1はレーザ光が遮られ、計測できないはずである。同様に、

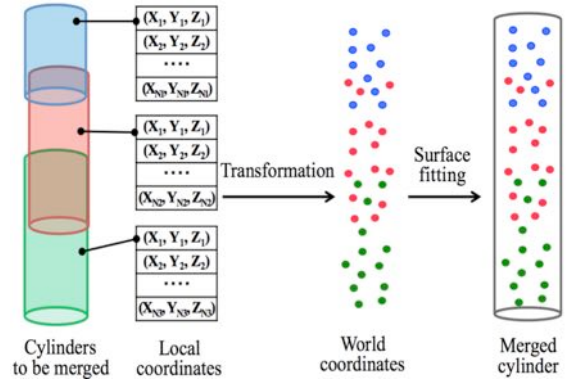


Fig.6 Reconstruction of merged pipes

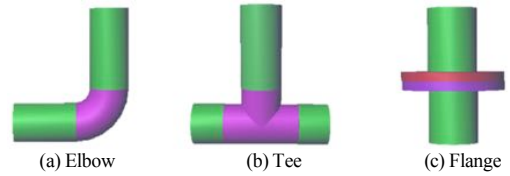


Fig.7 Reconstruction of connecting parts

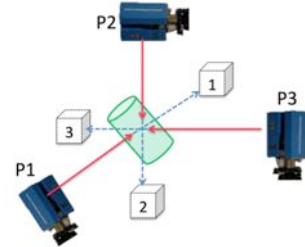


Fig.8 Verification of visibility from multiple scanning directions

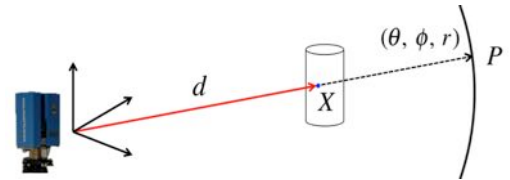


Fig.9 Comparison of distances

P2, P3の地点からは、立体2, 3は計測できない。もし、立体1, 2, 3のいずれかの計測データが得られているならば、円柱部材が存在するという仮定に反する。その場合には、円柱部材の存在は棄却される。

この考え方を複数点群に適用するために、部材モデル上の点を距離画像上へ投影する。まず、図4に示したように、世界座標系で記述された部材モデルに逆変換を施し、スキャナ座標系に変換する。次に、図9に示すように、仮想的なレーザ光と部材モデルとの交点Xを球面座標に変換し、距離画像上への投影する。このとき、投影点において、交点Xの原点距離 $d$ と計測点Pの原点距離 $r$ を比較して、以下のいずれであるかを調べる。

- (1)  $d = r$  ならば、計測点Pは部材上の点である。
- (2)  $d > r$  ならば、交点Xは手前の物体に隠されている。
- (3)  $d < r$  ならば、矛盾する。

上記の(1)(2)が成り立てば、部材が存在するという仮定に整合的である。一方、(3)のときは矛盾が生じる。

実際の計測では、円柱部材の輪郭付近で異常値が生じやすく、部材よりも遠方の点が多得られることが多い。また、円柱の位置計算の誤差によっても、輪郭近くで誤って矛盾と判定されることがある。そこで、本研究では、推定され

た部材上に仮想的なレーザ光を等角度で多数照射して適合度評価を行い、矛盾する点の比率が閾値以上になったときに部材を棄却することとした。本研究においては、実験に基づき、この閾値を15%とした。また、仮想的なレーザ光の照射角度間隔は、実際の計測データと同じとした。

複数点群による適合度評価においては、すべての計測データの距離画像上に部材モデルを投影して判定を行う。すべての距離画像に矛盾しない場合に限り、その部材モデルを採用する。この判定は、3.2で示した単一点群からのパイプモデル生成と、3.4に示した接続部材モデルの生成の二つの処理で用いている。

#### 4.2 複数視点からの信頼度評価

本研究においては、推定された部材が計測データに矛盾しない限りは、その部材モデルを生成している。しかしながら、条件(2)では、手前に別の物体が存在している場合も整合的としているので、部材上の計測点がほとんど得られていない場合でも部材モデルが生成されている。その場合、誤った部材を生成している可能性が否定できず、信頼性が低いと考えられる。そこで、最終的に生成されたモデルがどの程度信頼できるのかを判定するために、信頼度評価を導入する。

信頼度評価においては、図10のように、計測点のうち、実際に部材モデルに乗っている点の比率を考える。この図においては、検出されたパイプを破線で示し、計測点が得られている部分を赤のドットで示している。本研究においては、点群データ*i*の信頼度 $R_i$ を、距離画像上で部材が占める範囲の点の個数に対する部材上の点の個数の比率と定義する。また、すべての距離画像での信頼度のうちで最大の値 $R$ を複数点群データの信頼度と定義する。

信頼度が低い部材モデルは、どの計測地点からも死角となっている場合と、何らかの理由で誤った部材モデルが生成された場合が考えられる。本手法の実装においては、すべての部材モデルに対して信頼度を算出し、信頼度が閾値よりも低い部材をユーザに通知するようにした。図11はユーザが指定した閾値よりも信頼度が低い部材の色を変えて表示した例である。この例では、信頼度 $R$ が30%以下を閾値とした。

### 5. 評価実験

#### 5.1 複数点群データの統合

本手法の検証には、設備を7カ所から計測した点群データを用

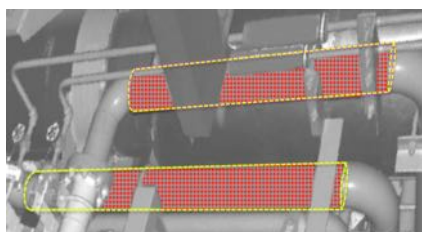


Fig.10 Reliability of generated models

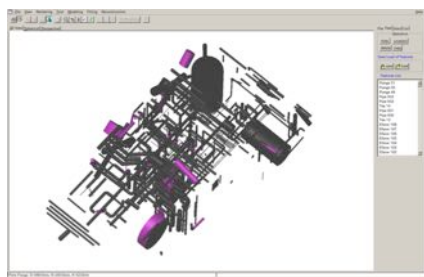


Fig.11 Components with low reliability scores

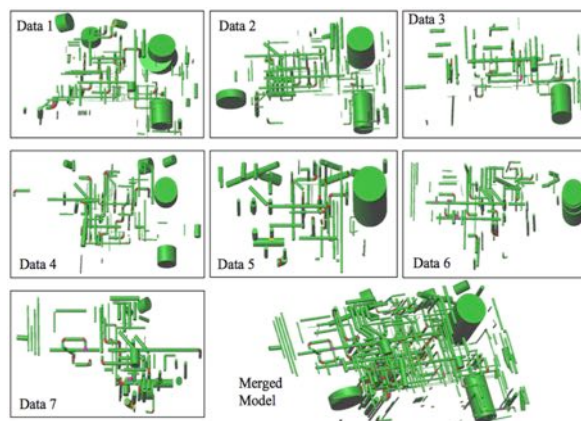


Fig.12 Components generated from each point-cloud

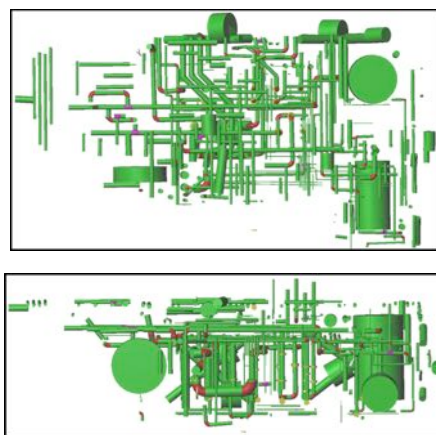


Fig.13 Top and side views of merged model

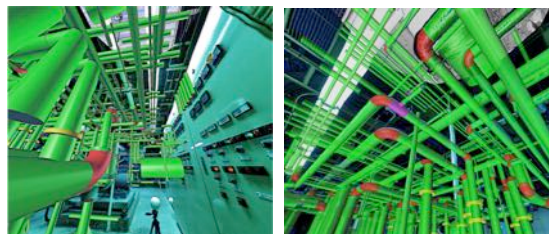


Fig.14 Reconstructed components with reflectance images

Table 1 Number of components generated from each point-cloud

	Points	Pipe	Elbow	Tee	Flange
Data1	40,660,717	205	43	5	21
Data2	40,538,597	184	27	6	11
Data3	9,842,495	99	19	4	1
Data4	9,842,495	149	27	1	17
Data5	10,016,136	94	21	0	3
Data6	9,911,855	117	21	4	2
Data7	9,747,396	111	26	2	4
Total	130,559,691	959	184	22	59

Table 2 Numbers of components in the merged model

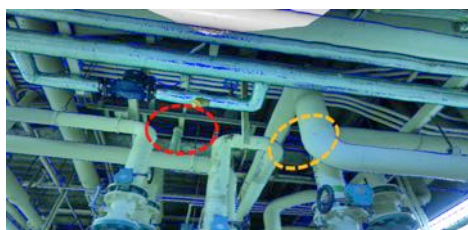
	Pipe	Elbow	Tee	Flange
Merged	514	96	14	37

いた。図 12 は、前報で提案した手法を用いてそれぞれの点群データから生成された部材モデルを Data1 から Data7 として、また本研究の手法を用いて複数点群データから生成された部材モデルも示している。図 13 は統合された部材モデルの上面図と側面図である。接続部材は、色を変えて表示している。

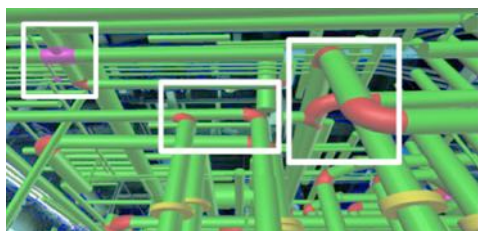
表 1 にそれぞれの計測データから生成された部材の数を示す。また、本手法を適用することにより生成された部材の個数を表 2 に示す。この例題では、個々の点群データから生成された 959 個のパイプが 514 個に統合されている。

図 14 は、生成された部材の妥当性を検証するために、統合した部材モデルを反射強度画像に重ねて表示したものである。複数点群を統合することで、妥当な部材モデルが生成されていることがわかる。ただし、これらの視点からは見えない部材も表示されているため、部材モデルは画像と完全に同じではない。

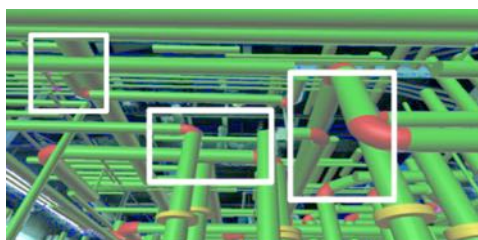
前報では、単一の点群データから曲面抽出を行い、部材モデルを生成する計算時間が、4000 万点程度の点群で 4 分から 6 分であることを示した。本稿では、7 個の点群データから生成されたパイプを統合し、接続部材を再構成する時間を評価した。クロック数が 3.40GHz で 8 コアの CPU を有する 64 bit PC で並列計算した結果、計算時間は 4 分 22 秒であった。



(a) Reflectance image



(b) Multiple candidates of connecting parts



(c) Selected parts

Fig.15 Verification from multiple views

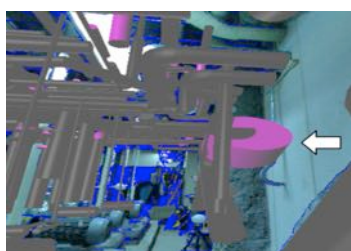


Fig.16 Detection of incorrect components

本研究においては、複数の点群データから生成されたパイプモデルを統合しているが、遠方から計測された場合や、一部しか見えない地点から計測した場合、またパイプに保温材が巻かれているような場合には、円柱の計算が不安定になり、パイプの統合に失敗することがある。ここでは、パイプを正しく統合できた比率を目視によって検証した。その結果、統合に成功したケースが 445 例、失敗が 22 例であり、パイプの統合の成功率は 95% であった。なお、統合に失敗する場合に対処する方法として、互いに干渉する部材が統合できない場合には、それらの部材をユーザに提示するなどの手法が考えられる。

## 5.2 複数視点からの適合度評価

複数視点からの適合度評価の妥当性を検証するために、適合度評価を適用した場合としなかった場合のそれぞれにおいて、生成された部材モデルを比較した。

図 15 に結果が異なる事例を示す。図 15(a) は反射強度画像である。この例題では、同軸関係や直交関係を持つパイプの組合せが複数存在する。図 15(b) では、可能性のある接続部材をすべて生成しており、明らかに矛盾したモデルが生成されている。図 15(c) は適合度評価を行った事例で、7 個の点群データのうち少なくとも一つで矛盾と判定された部材を除去している。この例から、複数視点からの適合度評価を用いることによって、妥当な部材モデルに絞り込まれていることがわかる。

## 5.3 部材モデルの信頼度評価

最終的に生成された部材モデルに対して、信頼度を評価を行い、部材に乗っている点の比率が 30% 以下の部材を検出した。結果を図 16 に示す。この例では、信頼性が低い部材から、保温材が巻かれているために誤って計算された円柱が確認できた。

評価実験に用いた点群データからは、合計 661 個の部材モデルが生成されており、それらのすべてをユーザが確認するのは容易ではないが、図 11 と図 16 に示したように、信頼性の低い部材は全体の一部であり、信頼度評価を用いることで、ユーザの確認作業の負荷を大幅に低減できる。

## 6. 結 言

本研究では、複数の点群データを用いて、配管システムの形状を再構成する方法を示した。本手法は、個々の点群データから生成したパイプモデルを統合し、その位置関係から接続部材を推定する。そして、推定した部材に関して複数方向からの可視性を判定し、矛盾のない部材を生成する。検証の結果、実用的な計算時間で、妥当な部材モデルが生成できることを確認した。また、信頼度を計算して信頼度の低い部材をユーザに提示する仕組みを実装し、その有効性を確認した。

今後は、形状再構成の信頼性をさらに高めていく必要がある。そのためには、対象物に関する知識を制約条件として利用することが有望と考えられる。今回は、配管システムを対象としたが、設備にはバルブや平面の部材も多く存在するので、それらについても適用できる手法を検討していく必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 松岡諒, 増田宏: 大規模点群からの生産設備の形状再構成 (第 1 報) 抽出曲面に基づく接続部材の推定と適合度評価, 精密工学会誌, **80**, 6 (2014) 604.
- 2) R. Schnabel, R. Wahl, and R. Klein: Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection, Computer Graphics Forum, **26**, 2 (2007) 214.
- 3) G. Lukacs, A.D. Marshall, and R.R. Martin: Faithful Least-Squares Fitting of Spheres, Cylinders, Cones and Tori for Reliable Segmentation, 5th European Conference on Computer Vision, (1998) 671.