

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 —

松岡 諒** 増田 宏***

Reconstruction of Structure Shapes of Facilities from Large-scale Point Cloud (1st report)
- Estimation and evaluation of connecting components based on extracted surfaces -

Ryo MATSUOKA, Hiroshi MASUDA

The recent progress of laser scanners makes it possible to capture dense point-clouds of large-scale facilities. Large-scale facilities are mainly composed of many primitive surfaces, such as planes, cylinders, cones, spheres, and tori. However, it is not easy to reliably extract these surfaces from point-clouds because it is actually difficult to capture complete point-clouds of surfaces. In this paper, we discuss how to reconstruct pipe structures from insufficiently extracted surfaces. In our method, we first extract planes and cylinders, which can be reliably extracted, and detect the relationship among detected surfaces on a depth image. Then we estimate shapes and locations of various pipe structures using the relationships among surfaces. Finally we verify estimated shapes based on visibility tests and eliminate inconsistent structures. In our experiments, our method could sufficiently reconstruct pipe structures using only a single scanning data.

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

1. 緒 言

生産設備のメンテナンスや改修の工程においては3Dモデルを使ったシミュレーションが有効である。しかしながら、改修が必要となる古い年代に作られた設備では、CADデータが存在しない場合も多く、存在する場合でも長年の度重なる改修工事によって、設計段階の3Dモデルと現状が異なってしまうという問題が発生する。そのため、シミュレーションには、現物の設備の計測に基づいた形状モデルの作成が必要となる。

近年では、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できるデータの大容量化・高精度化が進んでいる。高性能の位相差方式のレーザスキャナを用いれば、大規模環境において、高密度の点群を短時間で取得することが可能である。

しかしながら、計測によって得られた点群データから3次元モデルを作成することはまだ容易ではない。現状では、熟練作業者が部材の点群を指定しながら一つ一つモデル化を行っていくことが多く、モデル生成のために膨大な人手とコストが必要である。そのため、作業者の負担をより少なくできるように、点群データから部材・部品のモデルを生成する工程を可能な限り自動化することが求められる。

生産設備の点群データから部材・部品のモデルを生成する手法の開発に関して近年活発に研究が行われてきた。Masuda¹⁾らは、点群からレーザ反射強度画像が作成できることを利用して、2次元画像上でインタラクティブな点群モデリングが行える手法を示した。しかし、部材を逐一モデリングしていく必要がある。モデリングを自動化するための研究として、Kawashima²⁾、Mizoguchi³⁾、Aurelien⁴⁾、Lee⁵⁾らの研究がある。これらの研究では、複数位置から計測された点群を位置合わせしたデータを対象としている。そのため、一方向からのみしか点群が取得で

きていない場合や、オクルージョンによる欠落が存在する点群においては、計算が不安定になる。

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。また、大規模プラントにおいては、上部を計測するために足場を組むことが必要になるため、点群の欠落を少なくするコストが非常に大きくなる。こうした制約がある場合、全方位から計測された点群データを得ることは望めず、一方向からの計測データからでも、部材の位置や寸法が計算できることが求められる。

しかしながら、一方向のみから計測された点群においては、以下に示すような問題が発生する。

- (1) オクルージョンのために、単一の部材が複数に分断される。
- (2) 部分的な点群から曲面式を計算する場合、計算精度が低下し、必要な精度が確保できないことがある。
- (3) 裏側の点群がない場合、円錐やトーラスのように自由度が大きい曲面式の計算が不安定になる。

そこで本研究においては、上記の問題を解決するために、一方向から計測された点群データから、パイプ、エルボ、ティー、フランジ等の配管系統部材を自動的に認識し、形状を再構成するための手法について検討する。

不完全な点群を対象とした場合、すべての曲面を検出することは望めない。そこで、比較的良好な計算精度が得られていると考えられる部材を基準とし、規格表や部材接続の規則に基づいて、検出しにくい部材の種類や位置を推定して部材パラメータの再計算を行う。また、推定した結果の妥当性について検証するための手法についても示す。

以下、第2章では提案手法の概要について示し、第3章では距離画像に基づいた曲面要素の接続関係の抽出について論じる。第4章では曲面間の接続関係を用いて部材形状を推定する手法を示し、第5章では距離画像を用いることで推定された部材の適合度を評価する手法を示す。第6章では実データに提案手法を適用することで、提案手法の精度と計算時間を検証する。

* 原稿受付 平成25年12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 (東京都調布市布ヶ丘1-5-1)

2. 提案手法の概要

配管システム部材を自動的に認識して形状を再構成するための処理の手順を図1に示す。

配管システムの典型的な部材は、平面、円柱、円錐、トーラスから構成される。ただし、大規模設備を計測して得られた点群は不確かさが大きいので、比較的大きな許容誤差で曲面当てはめを行う必要がある。さらに、点が部分的にしか得られていない場合においては、よく知られた非線形最適化による曲面当てはめ⁶⁾を適用すると、円錐やトーラスでは計算が非常に不安定になり、正しい解を安定的に得ることは難しい。

上記のような制約を考慮し、曲面自動抽出においては比較的安定的に検出できる平面と円柱のみを検出することとする。検出できない曲面については、検出された曲面要素間の接続関係に基づいて推定を行う。

ここでは、曲面要素間の接続関係の検出は、探索領域を局所化するために、点群から生成した画像上で近傍にある曲面を探索する。中・長距離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座標値を取得していく。その際の緯度と経度で定義される2次元座標に計測された点を写像すると、点は格子状に配置される。本研究では、そのように配置された点群を距離画像と呼ぶ。

曲面要素の接続においては、まず、基準となる曲面を検出する。配管システムで最も多く現れるのはパイプであるため、まずパイプの位置と形状を求める。長さの短い円柱は、フランジの側面や、他の部材に隠されて分断されたパイプ、もしくは他の曲面が誤って円柱と認識された場合などが想定される。そのような場合、図2のように円柱の中心軸や径が正しく計算できないことが多い。そこで、比較的信頼性が高いと考えられる長さが一定値以上の円柱のみを採用してパイプの候補とする。分断されたパイプにおいては、既に検出されたパイプ上に点に乗っていれば、それらの点を統合して曲面を補正する。

次に、フランジ、エルボ、ティーがパイプの接続部材である点に着目し、接続性や部材形状の標準規格などから部材の位置や形状を推定する。そして、得られた接続関係を元に、エルボ、ティー、フランジのパラメータを推定する。

ただし、統合されたパイプや、接続関係と規格表から推定された形状は、実際の部材を正しく再構成していない場合も考えられる。そこで適合度判定を行い、推定された形状の妥当性を判定する。適合度判定では、部材モデルを点群画像上に投影して可視性判定を行い、矛盾が検出されたらその候補を除外する。

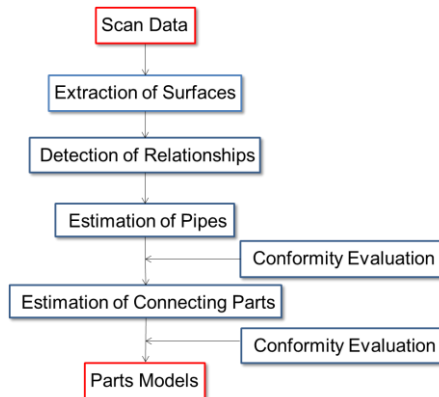


Fig.1 Process of shape reconstruction

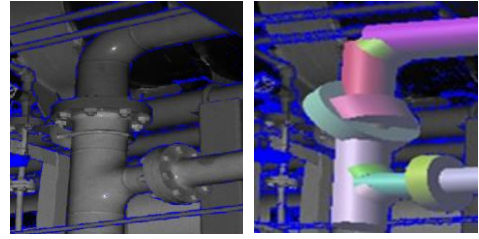


Fig.2 Incorrectly extracted cylinders

3. 曲面要素間の接続関係検出

3.1 距離画像生成と曲面検出

まず、点群の座標 (x, y, z) を球面座標 (θ, ϕ, r) に変換する。この計算は、 $(x, y, z) = (r \cos \theta \sin \phi, r \sin \theta \sin \phi, r \cos \phi)$ を解いて得られる。それにより、点群を (θ, ϕ) 平面に投影できる。

次に、 (θ, ϕ) 平面上で、点群を連結領域に分割する。高密度の点群計測ではサンプリング角度 $\Delta\phi$ が非常に小さいので、隣接点が照射された点の近傍の微小面を平面で近似できる。式(1)は、隣接点が同一平面上にあるときの点間距離である。ここで、 p_i は座標、 n_i は微小面の法線ベクトルである。隣接する点がこの距離と同等か小さいならば、同一面上の点であるとみなして、連結領域を検出する。

$$d = \frac{\Delta\phi |p_i|^2}{(p_i, n_i)} \quad (1)$$

検出された連結領域に対してRANSAC法を適用して、円柱と平面を検出する。RANSAC法はロバストであるが、大きな領域から小さい曲面を検出するには、多くの計算時間が必要となる。そこで、曲面検出の範囲を連結領域に限定することで、曲面検出を高速化する。

3.2 画像上での接続関係検出

距離画像上において、図3に示すように各画素を曲面要素と関連付け、座標、連結成分の領域番号、検出された曲面番号を記述する。図4は、同一曲面として検出された画素を同じ色で示した画像である。

次にそれぞれの画素に関して近傍の画素を検索して、部材を構成する曲面要素同士の接続関係を検出する。曲面要素間の接続関係検出に画像を用いることにより、探索領域を局所化し、処理を高速化することができる。

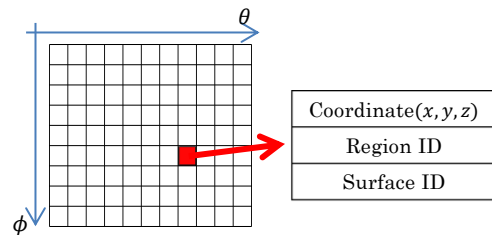


Fig.3 Data structure of a distance image

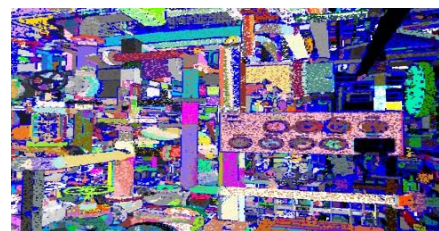


Fig.4 Surfaces extracted from a distance image

4. 部材形状の推定

4.1 部材形状の推定規則

曲面要素間の接続関係を用いて部材形状を推定するために、以下の条件を満たす関係を検出する。本研究では、中心軸の判定における角度の許容誤差を 10 度、また中心軸と平面の角度については許容誤差を 30 度とした。

- (1) 中心軸が一致する円柱要素
- (2) 中心軸が直交する円柱要素
- (3) 中心軸が 45 度で交わる円柱要素
- (4) 中心軸と直交する平面

表 1 は、曲面間を用いて、部材を推定するための規則をまとめたものである。パイプに関しては、同一軸を持つ円柱の集合として再構成する。フランジ、エルボ、ティーに関しては単独での再構成が難しいため、生成されたパイプとの接続関係を用いて形状を推定する。

Table.1 Rules for connecting surfaces

	Usage	Relationship of Surfaces
Pipe	-	• A group of cylinders that have the same axis and radius.
Elbow	Connect pipes by 90°	• Two cylinders whose axes intersect orthogonally. • The intersecting point of two axes is out of the cylinders.
	Connect pipes by 45°	• Two cylinders whose axes intersect by 45 degree.
Tee	Connect pipes at T-junction	• Two cylinders whose axes intersect orthogonally. • The intersecting point of two axes is inside one of the cylinders.
Flange	Connect pipes on the same axis	• Two cylinders that have the same axis and different radius.
		• The axis of a cylinder and the normal of a plane are the same direction.

4.2 パイプの推定

JIS 等の規格表において十分近い半径があれば、円柱の半径をその値に置き換える。そして、軸を共有する円柱要素のうち、半径が等しい円柱をグループ化してパイプ部材を生成する。その際、点群を統合して、円柱形状を再計算する。図 5 は本手法によって、統合されたパイプの例である。

ただし、パイプの長さが小さい場合は、十分な精度は見込めない。そこで、円柱の長さが閾値 l_t より大きい場合をパイプとした。本研究では、 $l_t = 0.40(m)$ を用いた。

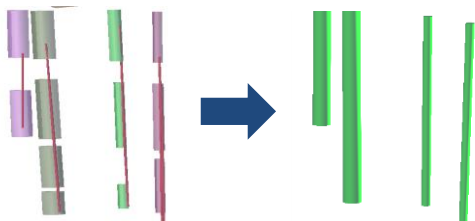


Fig.5 Estimated shapes of connected pipes

4.3 接続部材モデルの推定

エルボ、ティー、フランジはいずれもパイプ同士を互いに接続するために用いられる部材である。これらの部材に関しては、サイズと接続するパイプの径が JIS 規格によっ

て定められている。そこで、得られた接続関係を元にして JIS 規格から最も形状に近い部材を推定する。

4.4 エルボの推定

エルボは主に 2 つのパイプ同士を 45 度または 90 度で接続する用途で用いられる。90 度で接続する場合、エルボの推定には、図 6 のように二つの円柱軸がほぼ直交し、2 軸の交点が円柱の外部に存在することが条件となる。

エルボは 1/4 トーラスとして形状再構成することができるので、二つのパイプの軸方向と半径から 1/4 トーラスを推定する。また、接続する曲面要素の両端が分かっているため、未検出のパイプ領域を自動的に補完して部材モデルを生成できる。図 6 は本手法の適用例である。

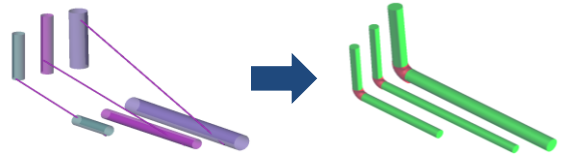


Fig.6 Estimated shapes of elbows

4.5 ティーの推定

ティーは一般的に三つのパイプ同士を T 字型に接続する用途で用いられる。同軸上に存在する 2 つのパイプは滑らかに接続しているため、ここでは一つのパイプのみを推定する。ティーの推定には図 7 のように、二つの円柱軸の交点が一方の円柱要素の内部に存在するような直交関係を用いる。

ティーの形状は二つの円柱の和集合として表現できる。接続する二つパイプの半径と軸方向から、ティーの形状を推定し、対応するサイズが存在しない場合には棄却する。図 7 は本手法の適用例である。



Fig.7 Estimated shape of a tee

4.6 フランジの推定

フランジは主に同軸同半径のパイプ同士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、レーザ計測では、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。

円柱が検出される場合、フランジの推定においては、図 8 のように、半径の異なる同軸上の円柱要素間の接続関係を用いる。平面が検出される場合には、円柱と平面の直交関係から、フランジの位置を推定する。

規格より、パイプの径からフランジの形状が決まる。また、位置に関しては接続するパイプの軸を基準とし、フランジの軸方向を定める。図 8 は本手法の適用例である。

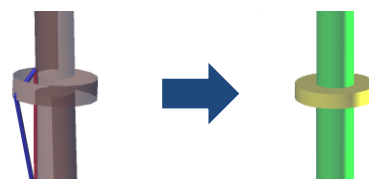


Fig.8 Estimated shape of a flange

5. 適合度評価

前章で示した手法によって推定された部材形状には誤った形状も含まれている。そこで、推定された部材形状を距離画像上に投影し、適合度を評価する。本研究では、可視性に対する整合性を調べることで、誤って推定された部材を取り除く。

計測原点からの距離を考えた場合、図 9 のように、推定された部材が距離画像上の点よりも手前にあるならば、計測された点群は得られないはずなので、計測結果と矛盾する。そのため、このような部材形状は計測結果に適合していないとして取り除く。

可視性に基づく整合性判定では、推定された部材形状の点群を仮想的なレーザスキャナによって計算する。仮想的なレーザ光の計測ピッチは実際の計測データと対応させ、距離画像の画素に対応させる。

仮想的なレーザで得られる点群は図 10 のようになる。この図において、赤は実計測データよりも手前にあるために矛盾と判定されたピクセル、青は整合的なピクセルである。

ここでは、部材モデルが距離画像に占める点の数を N とし、可視性に矛盾する画素の数を N_v とするとき、可視性に対する矛盾度 P を式(2)によって評価する。

$$P = \frac{N_v}{N} \quad (2)$$

P の値が大きいほど、計測データに対する推定された部材形状の矛盾が大きい。 P が閾値よりも大きい場合には、推定された部材を除去する。検証では閾値の値を 0.15 とした。

図 11 は本手法の適用例である。誤って生成されたフランジの部材モデルが適切に除去されていることが確認できる。

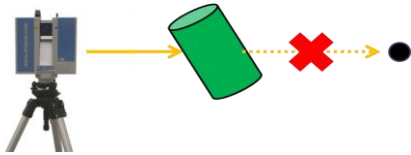


Fig.9 Verification by visibility check

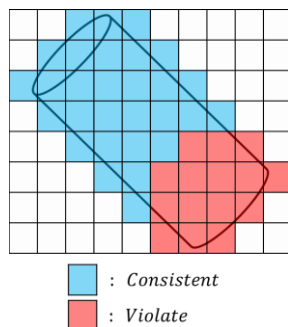


Fig.10 Visibility check at each pixel

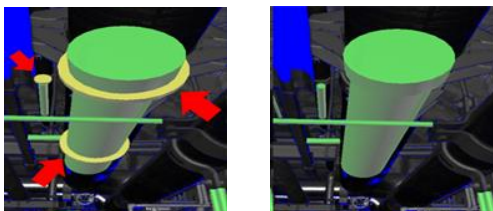


Fig.11 Elimination of inconsistent structures

6. 検証実験

6.1 検証条件

計算機は 12GB のメモリをもつ 64bit PC を用いた。CPU のクロック数は 3.40GHz である。

提案手法の検証には、二つの生産設備の計測データを用いた。設備 A を図 12(a) に示す。点群は 3389 万点で構成され、パイプ、エルボ、ティー、フランジはそれぞれ 225 個、51 個、11 個、38 個確認できた。設備 B を図 12(b) に示す。4066 万点で構成され、パイプ、エルボ、ティー、フランジはそれぞれ 153 個、55 個、10 個、20 個確認できた。なお、確認した部材の個数は目視により、距離画像上において、部材の 7 割程度が確認できる部材とした。

6.2 実験結果

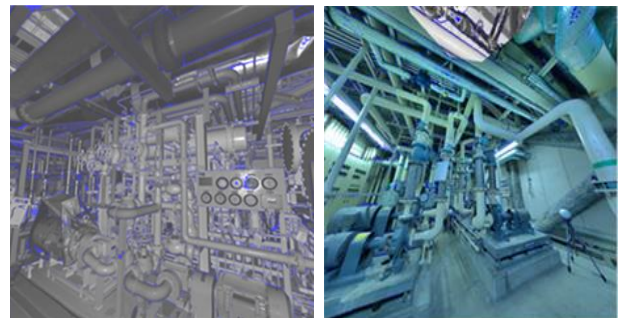
図 13 は設備 A において抽出された部材モデルを示している。図 14 は設備 A の点群から抽出された円柱を表示したもので、図 15 は最終的に生成されたモデルである。提案手法を適用することで、図 14 のような断片的に抽出された曲面から、図 15 のような部材ごとに認識されたモデルを生成できることがわかる。また、図 16 は設備 B の点群から生成された部材のモデルである。

それぞれの計測データから生成されたモデルに関して、検出された部材の適合率と再現率を検証した結果を表 2 と表 3 に示す。適合率は生成された部材のうち、実際に存在する部材を正しく再構成したものの比率である。また、再現率は計測データ内で確認した部材のうち、正しく生成された部材の比率である。表 4 では適合度評価を適用することで、適合率がどの程度改善するかを示している。適合率に関しては表 4 に示したように、全て 80% 以上と高い結果となった。

これらの結果から、本論文で提案する部材推定と適合度評価による手法は十分有効であると考えられる。

一方で、再現率に関しては適合率と比べると全体的に低い値となった。これは、遠くにある部材やオクルージョンの大きい部材の再構成が困難であることに起因する。このような部材については、単一の点群から再構成することは困難なので、近くから計測した別の点群データが必要となる。また、再現率に関して特にエルボとフランジではそれぞれ 63%、55% とやや低い数値になった。この原因は、接続するパイプの長さが短いため中心軸の精度が悪く、再構成できないケースが多かったためである。

計算時間を表 5 に示した。計算時間は 4 分から 6 分程度であり、実用的な計算時間でモデルを生成できたといえる。



(a) Point-cloud of Facility A

(b) Point-cloud of Facility B

Fig.12 Example of point-clouds

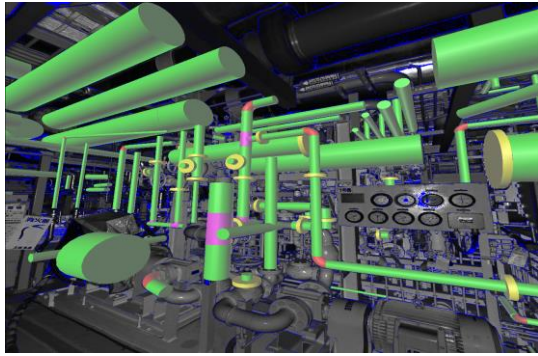


Fig.13 Result of shape reconstruction for Facility A

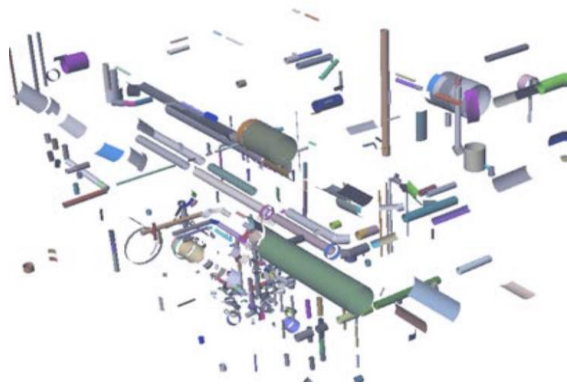


Fig.14 Extracted cylinders from a point-cloud of Facility A

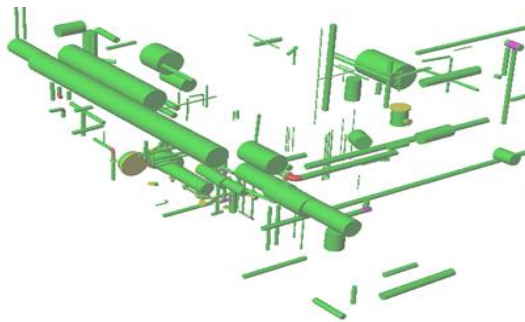


Fig.15 Extracted structures in Facility A

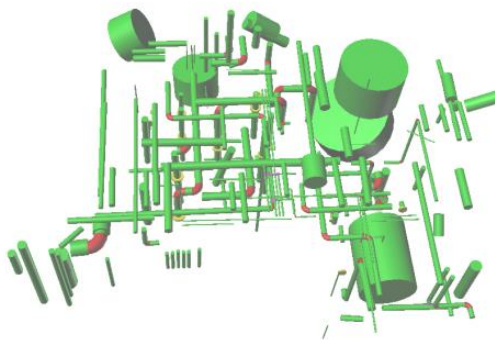


Fig.16 Extracted structures in Facility B

Table.2 Rate of conformity

	Pipe	Elbow	Tee	Flange
Facility A	188/195(96%)	32/35(91%)	9/11(82%)	21/23(91%)
Facility B	132/151(87%)	39/45(87%)	8/10(80%)	10/14(71%)
Total	320/346(92%)	71/80(89%)	17/21(81%)	31/37(84%)

Table.3 Rate of recurrence

	Pipe	Elbow	Tee	Flange
Facility A	188/225(84%)	32/51(63%)	9/11(82%)	21/38(55%)
Facility B	132/153(86%)	39/55(71%)	8/10(80%)	10/20(50%)
Total	320/378(85%)	71/106(67%)	17/21(81%)	31/58(53%)

Table.4 Effect of conformity evaluation

	Pipe	Elbow	Tee	Flange
Apply	198/213(93%)	34/47(72%)	11/20(55%)	29/42(69%)
Not Apply	188/195(96%)	32/35(91%)	9/11(82%)	21/23(91%)

Table.5 Timing of calculation

	Surface Extraction	Model Generation	Total
Facility A	3 m 54 s	0 m 53 s	4 m 47 s
Facility B	3 m 48 s	1 m 50 s	5 m 38 s

7. 結 言

本研究では、現実的な計測の制約を考慮して、単一の点群データからパイプ、エルボ、ティー、フランジの形状モデルを自動的に生成する手法について検討した。そして、抽出した円柱要素間の接続関係を用いて部材モデルを推定し、可視性の観点から適合度を評価する手法を提案した。また、実データを用いてモデル生成の精度を検証し、本手法を適用することで適合率の高い部材モデルを生成できることを示した。

なお、本研究では単一の点群のみを用いたが、計測データが複数存在する場合には、それぞれの計測データから生成された部材モデルを統合することが可能である。提案手法によって生成された部材モデルは適合度が十分に高いが、統合された部材モデルでは、適合度がさらに高まると考えられる。また、遠方の部材も再現できる可能性が高くなるために、再現率も向上すると考えられる。そのための手法と検証については、今後考えていく予定である。

参 考 文 献

- 1) H. Masuda, I. Tanaka: As-Built 3D Modeling of Large Facilities Based on Interactive Feature Editing, *Computer-Aided Design & Applications*, **7(3)**, (2010)349
- 2) K. Kawashima, S. Kanai, H. Date: As-Built Modeling of Piping System from Terrestrial Laser Scanned Point Clouds Using Normal-Based Region-Growing, *2013 Asian Conference on Design and Digital Engineering*, Seoul, Korea, (2013).
- 3) T. Mizoguchi, T. Kuma, Y. Kobayashi, K. Shirai: Manhattan-World Assumption for As-Built Modeling Industrial Plant. *Key Engineering Materials*, **523**, (2012)350-355.
- 4) B. Aurelien, R. Chaine, R. Marc, G. Thibault, S. Akkouche: Reconstruction of Consistent 3D CAD Models from Point Cloud Data Using A Priori CAD Models, *ISPRS Workshop Laser Scanning 2011*, **26**, (2011).
- 5) J. Lee, C. Kim, H. son, C. Kim: Skeleton-Based 3D Reconstruction of As-Built Pipelines from Laser-Scanned Data, *ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering*, (2012) 245.
- 6) G. Lukacs, A. D. Marshall, R. R. Martin: Faithful least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori for reliable segmentation, *Proceedings, 5th European Conference on Computer Vision*, (1998) 671.