

三次元点群を用いた木質部品制作の支援に関する研究

○大野 湧人*¹ 古庄 玄樹*¹
加戸 啓太*² 平沢 岳人*³

キーワード：三次元スキャナ、点群、形状比較

1. はじめに

建築空間を把握するための手法の一つとして、コンピュータビジョンがある。画像や動画を対象として長く研究されているが、近年の三次元スキャナの高解像化、低価格化にともない三次元点群を用いた研究も盛んである。施工現場を三次元復元し出来形の評価に利用するといった報告もなされている¹⁾。

三次元スキャナで計測した三次元点群は画像と異なり各点が三次元座標をもつため、計測対象の形状をより正しく認識し、計測した部品と設計情報を紐づけた運用が期待できる。例えば、計測部品がどの設計データによるものか把握できれば施工時の部材選択や施工手順の教示に活用でき、出来形と設計データの違いが求められれば、検品作業の効率化や自動化につながると考えられる。しかし、計測データと設計データの性質は異なり、三次元計測された点群データは、一般に、スキャン範囲内の物体の表面部分に三次元位置と色情報をもつ複数の点から構成されるが、BIMなどの設計データはメッシュデータから構成される。

そうした異なる性質のデータを紐づけるための手法のひとつとして、点群から再構築したメッシュデータを評価することがあげられる。しかし、メッシュの再構築には形状の解釈が必要で、パラメータ設定が難しい。多くの場合、評価したい細部が丸められてしまうか、それ以外の部分が過剰に細かいメッシュになり、設計データと比較するための定石のような手法はまだないようである。

一方で、深層学習を用いた点群として三次元モデルを生成しようという研究²⁾の中では、生成した点群と教師となる点群を直接比較することで学習を行うアプローチが採られている。そこから着想を得て、設計データを点群に変換し、点群同士を評価することで、三次元計測による実空間上の建築部品の把握ができないかと考えた。

本報告では、三次元スキャナにより計測した三次元点群と設計データから変換した三次元点群を形状類似度という指標で比較し部品を識別しようという手法について述べる。

2. 形状類似度

二つの三次元点群同士で表された形状が、どの程度一致するものであるかは、端的には三次元点群同士を重ね合わせて、その重なり具合を算出することで求められる。点群

とメッシュデータ、あるいはメッシュデータ同士の形状を評価する場合と比較して明快である。

三次元点群を重ね合わせると、形状に近いほど重なり合い、一方の点群のある点から、他方の点群における最近傍点までの距離は常に小さくなる。**Chamfer 距離**²⁾³⁾はこれに基づき、点群同士の重なり具合の指標として、点群(集合) $S_1, S_2 \subseteq \mathbb{R}^3$ に対し、

$$d_{CD}(S_1, S_2) = \sum_{x \in S_1} \min_{y \in S_2} \|x - y\| + \sum_{y \in S_2} \min_{x \in S_1} \|x - y\|$$

$d_{CD}(S_1, S_2)$: S_1 と S_2 の Chamfer 距離

x : S_1 に含まれる点

y : S_2 に含まれる点

として定義される類似度の指標である。これは、ある集合の各点において、他方の集合における最近傍点までの距離の総和をそれぞれ足した距離である。本研究では、**Chamfer 距離**を点群同士の重なり具合の評価とするが、三次元計測した点群や設計データから生成した点群は、それぞれ点の数が異なるため、それぞれの総和を点の数で割り、正規化したものを用いる。また、便宜上正規化した **Chamfer 距離**を単に **Chamfer 距離**と表記する。

点群同士を重ね合わせたとき、その形状が大きく異なっていると、他方の点群への最近傍点までの最近傍点間距離が大きい点が増え **Chamfer 距離**が大きくなり、形状が近かければ、最近傍点間距離の小さい点が増え、**Chamfer 距離**が小さくなる。このように、計測した三次元点群と設計データ(から変換した)三次元点群の **Chamfer 距離**により形状類似度を評価する。

3. 形状類似度を用いた部品の識別

三次元計測した点群データ(計測データ)と設計データから計測部品の識別を試みる。前述の通り三次元点群同士の **Chamfer 距離**により形状類似度が評価できるが、計測データには、部材加工時の制作誤差や三次元復元の計測誤差を含みうるため、その処理をはじめいくつかの手順が必要となる。大まかに部品の計測、設計データの点群変換、形状類似度の算出の3ステップに整理し、以降で具体的に説明する。本研究では三次元スキャナは YOODZ 社の YCAM3D、点群処理ライブラリとして Point Cloud Library (PCL)⁴⁾ と Open3D⁵⁾、最近傍点探索ライブラリとして Faiss⁶⁾ を利用する。

3.1. 部品の計測

設計データと重ね合わせて形状類似度を評価するために、部品の全周を計測し三次元点群とする。スキャンの際の環境は図1に示す通りである。全周を復元する手順として、対象部品の全周囲から計測し、各計測データから部品部分の点群を抽出し、抽出した点群間で正しい位置関係を推定し合成する。以下この手順について説明する。

計測データから部品部分の点群を抽出する手法を説明する。計測データには、計測部品のほかに、計測環境の床面と計測時のノイズが混入し、部品部分以外の点群が存在するため、部品部分の点群を抽出する処理を行う（図2）。床面に発生した点群は、計測データの最大平面を推定し取り除く。計測時のノイズには、まばらに発生する疎な外れ値と、まとまって発生する密な外れ値がある。疎な外れ値は、点の分布から統計的に処理して取り除くことができる。密な外れ値については、セグメンテーション⁷⁾をおこない、最も大きいクラスタ以外を取り除く。以上の処理を全ての計測データに対しておこない、計測データから部品部分の点群を抽出する。

対象部品の全周を復元するため、様々な方向から三次元計測をおこなうが、それらを合成して全周の三次元点群とする必要がある。計測データ毎の部品部分の点群が、計測対象のどの部分に相当するかについて、点群の正しい位置関係を推定しながら合成を行う（図3）。位置関係の推定は2ステップに整理できる。まず、マーカトラッキングを用いて位置合わせをする。部品をマーカ上に配置し、カメラ座標系の点群とカメラ画像を取得する。カメラ画像のマーカから姿勢推定をおこない、カメラ座標系の点群をマーカ座標系へと変換する。マーカトラッキングにはOpenCV⁹⁾を使用する。マーカによる位置合わせでは、カメラ座標系の点群データとカメラ画像データ間の計測誤差やマーカの姿勢推定の誤差が生じる。次に、そうしたズレを補正するため、点群間で相対的に位置合わせをおこなうレジストレーション手法のひとつである、Iterative Closest Point (ICP) レジストレーション¹⁰⁾によって位置合わせを調整する。計測されない底面以外の全周が復元されるように、位置合わせと合成を繰り返し、部品の全周を復元したものを復元点群とする。

3.2. 設計データの点群変換

復元点群と重ね合わせて形状類似度を評価するため、設計データを点群に変換する。設計データの三角形メッシュはそれぞれ大きさが異なるため、メッシュデータ全体に点を密に発生させてから一様にダウンサンプリングすることで、点の偏在を避ける。設計データから変換した点群を辞書点群とする。また、復元点群には底面部がないため、設計データの底面を除いた点群を生成する。



図1 三次元計測の環境

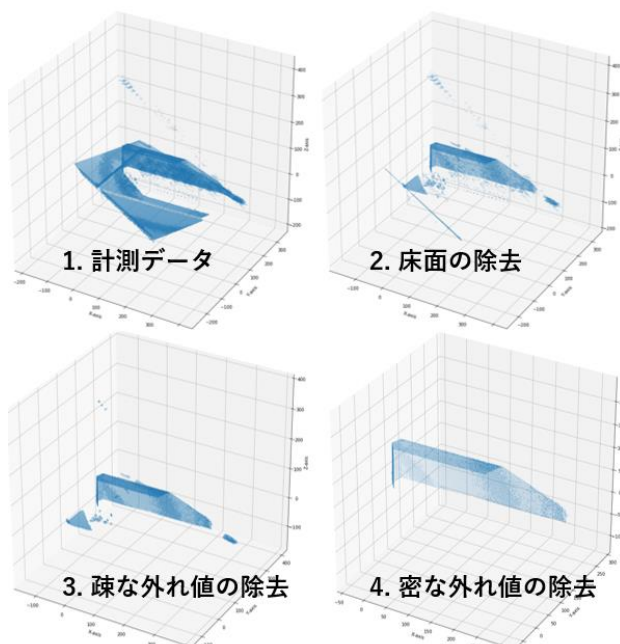


図2 計測データから部品部分の抽出手順

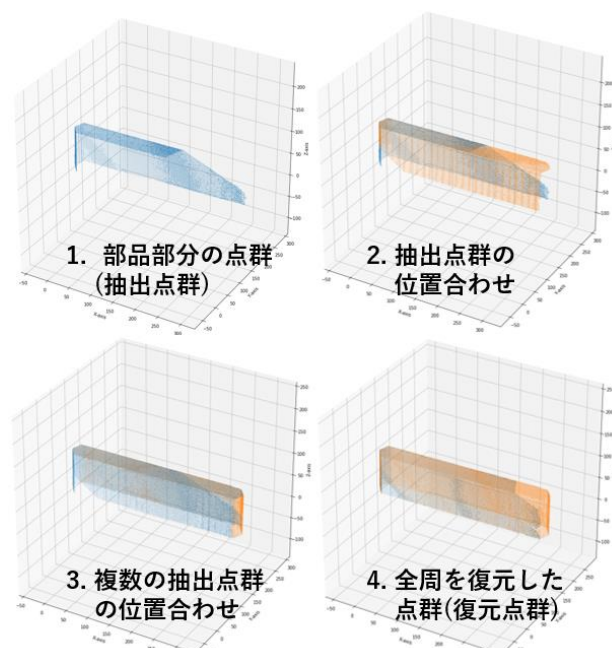


図3 複数の抽出した点群から全周の復元

3.3. 形状類似度の算出

それぞれ形状や配置が異なる点群同士を重ね合わせるため、まず点群の局所的な特徴量をてがかりに大まかに重ね合わせ、ICP レジストレーションによる調整をおこなう。それぞれの点群において Fast Point Feature Histograms (FPFH)特徴量¹¹⁾を計算し、特徴量の対応を探索する RANSAC 推定をおこなう。

しかし、後述する検証実験の識別対象の木質部品は、角材から切り出されているために対称性が強く、局所的な特徴量ベースのレジストレーションをもちいたことで、局所解となる反転して重なり合うことがしばしば見られた。そこで、FPFH 特徴量の RANSAC 推定と ICP による重ね合わせと、その後に辞書点群のバウンディングボックスの各軸方向に 180 度回転し、ICP から調整したときのそれぞれで Chamfer 距離を計算し、最も小さい Chamfer 距離をその設計用データとの形状類似度とする。

すべての辞書点群に対して、形状類似度を算出し、形状類似度が最小となる部品を計測対象の設計データとする。

4. 検証実験

五角形平面充填を表現した壁面（図 4）を構成する木質部品を対象にして、部品を識別する実験をおこなう。役物を除く、図 5 に示す 8 種類の部品を識別する。4 種の短い部品と 4 種の長い部品であるが、長さが近い部品らの形状は非常に近く、共通して両端に微妙に角度の異なる斜め加工が施されている。

計測対象と設計データの形状類似度の結果は表 1 となった。計測対象と設計データが正しい組み合わせにおいて、形状類似度が最小となり、部品の識別へ有効であると確認できる。また、正しい組み合わせではないが形状がよく似ている設計データとの形状類似度は最小値と近い値となった。例えば、1s と 4s の形状類似度は最小値と非常に近い。それぞれの形状を比較すると、全体の大きさと一方の端部はほとんど同じであるが、一方の端部のみがやや異なる。重ね合わせると、一方の端部は重なり合わないが全体的に重なり合うため（図 6）、Chamfer 距離が最小値と非



図 4 五角形平面充填を表現した壁面



図 5 検証対象（左から 1s, 2s, 3s, 4s, 5l, 6l, 7l, 8l）

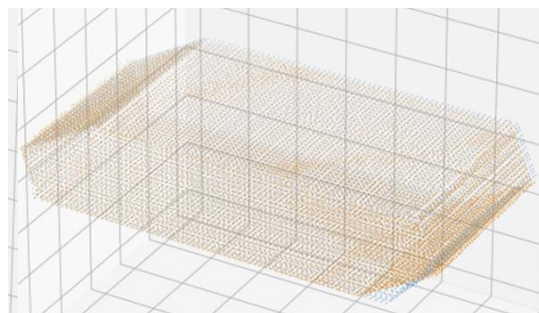


図 6 1s と 4s の重ね合わせ

常に近くなる。そこで、4s の復元点群を、4s の辞書点群と 1s の辞書点群に重ね合わせたときの最近傍点間距離の分布を可視化し、比較すると図 8 のようになる。その分布は、最近傍点間距離 1.0mm から 1.3mm 程度に集中し、それぞれ同じような傾向にある。ばらつきを見ると、4s と 1s ではより幅広く分布しており、特に、4s と 4s の分布には

表 1 検証結果

		設計データ							
		1s	2s	3s	4s	5l	6l	7l	8l
計測対象	1s	2.20	4.90	4.43	2.93	58.43	38.93	53.90	56.79
	2s	4.89	3.07	4.92	5.39	58.73	54.52	54.07	53.69
	3s	4.52	5.71	2.04	5.46	53.17	67.59	60.41	62.31
	4s	2.73	5.51	5.05	2.21	50.43	58.88	53.35	54.22
	5l	2221.88	3169.64	6499.11	2102.98	4.75	9.56	19.67	13.07
	6l	6613.04	2342.75	4023.03	2202.56	6.76	4.86	10.78	11.69
	7l	5985.56	4212.12	8264.91	5989.46	6.87	5.00	4.27	4.96
	8l	2093.12	2760.85	2685.12	4144.60	8.74	6.11	4.71	4.16

表れない最近傍点間距離 4.8mm 以降にも分布していることがわかる。これまでの検証では、最近傍点間距離の平均を意味する Chamfer 距離を類似度として、部品の識別に用いその有効性を示したが、さらに、最近傍点間距離の分布を分析することから有益な情報が導ける可能性がある。前述のように 1s と 4s は、外形が等しく一端のみがやや異なる部品であるが、これを対象とした検証では、Chamfer 距離が近くても、最近傍点間距離の分布においては、距離の大きな点が一定量含まれることがわかり、これは形状の差異とも整合する結果である。引き続き、多くのサンプルをもって検証を行う必要があるが、局所的な形状の差異がこの最近傍点間距離の分布から判断できれば、部品制作における加工不良に起因する形状のエラーを検査するといった活用が提案できると考えられる。

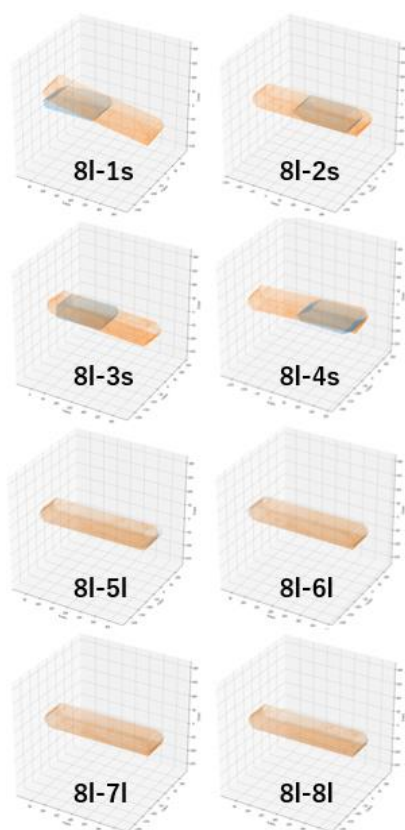


図 7 81 の復元点群と各辞書点群の重ね合わせ

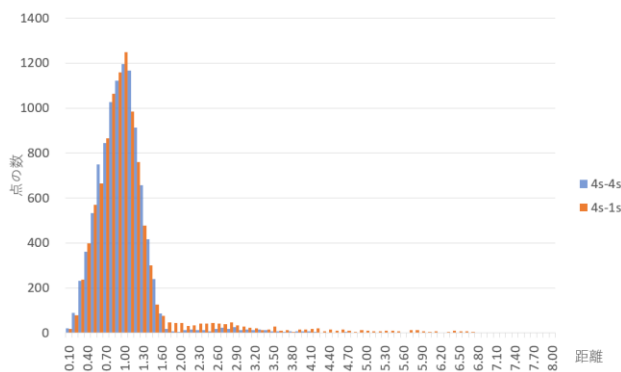


図 8 最近傍点間距離の分布 (4s-4s と 4s-1s)

5. まとめ

三次元計測した部品と設計情報の紐づいた運用を目標に、三次元点群を用いた形状の一致の程度を評価する形状類似度と、形状類似度による部品の識別手法を提案した。

形状類似度として、点群同士を重ね合わせ、重なり具合を評価する、点群の各点の最近傍点間距離の平均を意味する Chamfer 距離を用いる。部品の識別は、三次元計測した部品データと設計データに対して、部品の計測、設計データの点群変換、形状類似度の算出をおこない、形状類似度の比較から設計データを特定する。

検証実験として、8 種の木質部品を対象に提案手法を適用し、部品データと設計データのすべての組み合わせにおいて形状類似度を算出した。検証結果から、正しい組み合わせにおいて形状類似度が最小となり、提案手法の有効性が確認された。一方で、最近傍点間距離の分布を比較すると、分布のばらつきと形状の差異に関連性がみられた。最近傍点間距離の分布に注目することで、局所的な形状の差異を判断し、加工不良による形状のエラーを検査するといった可能性が考えられ、引き続き検討していきたい。

【参考文献】

- 1) 石田航星, 嘉納成男, 五十嵐健, 他 4 『内装部材のプレカット化のための 3 次元レーザースキャナーを用いた計測と生産 設計の手法に関する研究』, 日本建築学会計画系論文集 第 78 巻 第 688 号, pp.1355-13636
- 2) H. Fan, H. Su, and L. J. Guibas. A point set generation network for 3d object reconstruction from a single image. CoRR, abs/1612.00603, 2016
- 3) J. Shotton, A. Blake, and R. Cipolla. Multiscale Categorical Object Recognition using Contour Fragments. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI), 30(7):1270-1281, 2008.
- 4) <http://pointclouds.org/>
- 5) <http://www.open3d.org/>
- 6) J. Johnson, M. Douze, and H. Jegou. Billion-scale similarity search with gpus. arXiv:1702.08734, 2017.
- 7) T. Rabbani, F. van den Heuvel, and G. Vosselman. Segmentation of point clouds using smoothness constraint. In IEVM 06, 2006.
- 8) R. B. Rusu, Z. C. Marton, N. Blodow, M. Dolha, and M. Beetz. Towards 3D Point Cloud Based Object Maps for Household Environments Robotics and Autonomous Systems Journal (Special Issue on Semantic Knowledge), 2008.
- 9) <https://opencv.org/>.
- 10) P. J. Besl, N. D. McKay, A method for registration of 3-D shapes, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 14, no. 2, pp. 239-256, 1992.
- 11) R. B. Rusu, N. Blodow, and M. Beetz. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration. In ICRA, 2009.

*1 千葉大学大学院 融合理工学府 博士前期課程

*2 千葉大学大学院 工学研究院 助教 博士 (工学)

*3 千葉大学大学院 工学研究院 教授 工博