

Title	土木構造物の計測点群データから維持管理に用いる3 次元ポリゴンモデルの自動生成手法に関する研究	
Author(s)	日髙, 菜緒	
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文	
Version Type	e VoR	
URL	https://doi.org/10.18910/69597	
rights		
Note		

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

土木構造物の計測点群データから 維持管理に用いる3次元ポリゴンモデルの 自動生成手法に関する研究

日髙 菜緒

2018年1月

大阪大学大学院工学研究科

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 土木構造物維持管理の現状	1
1.1.2 土木構造物維持管理の電子化のための取り組み	1
1.1.3 CIM モデルの用途と作成手法	2
1.1.4 3次元計測点群データの技術	3
1.2 研究の目的	8
1.3 論文の構成	8
第2章 既往研究	10
2.1 点群から BIM/CIM/as-is モデルを生成する手法	10
2.2 点群からポリゴンモデルを生成する手法	11
2.3 本研究の新規性	12
第3章 研究の概要	13
3.1 開発手法の概要	13
3.2 開発環境	14
第4章3次元検索技術と位置合わせを利用したポリゴンモデル化手法	16
4.1 入力点群の前処理	17
4.2 局所的三次元マッチングを用いた類似領域検索とセグメンテーション	17
4.3 類似領域へのテンプレートポリゴンモデルの配置	21
4.3.1 位置合わせ後の誤差計算方法	25
4.4 3種類のテンプレートポリゴンモデル生成手法	25
4.4.1 写真測量	26
4.4.2 3 次元 CAD モデル	26
4.4.3 セルフマッチング	27
4.4.4 3 種類の手法の比較	
4.5 検証実験	29
4.5.1 堤防	29
4.5.2 モノレール	
4.6 <i>万祭</i>	47
4.6.1 ホリコンモナル化精度について	47
4.6.2 既仔のホリコンモナル化手法との比較	
4.0.3	
4.0.4 ノルユリヘムに関りる順硬性 4.6.5.2 つの手注の比較	
4.0.3 5 500 十伝の比較	
4.0.0 枻打日生、ツク川川にわける計画	

4.6.7 制限事項	52
4.7 結論	53
第5章 スケルトンに沿った規格断面のスイープによるポリゴンモデル化手法	54
5.1 スケルトン検出	54
5.2 スイープ	57
5.3 検証実験	58
5.4 考察	63
5.4.1 欠損やノイズ, モノレールの規模に対する頑健性	63
5.4.2 スケルトンのサンプリング間隔とポリゴンモデル化精度の関係	65
5.4.3 既存のポリゴンモデル化手法との比較	65
5.4.4 維持管理への利用における評価	65
5.4.5 制限事項	66
5.5 結論	66
第6章 鉛直断面のロフトを用いたポリゴンモデル化手法	68
6.1 中心軸検出	69
6.2 断面検出	71
6.3 ロフトによるポリゴンモデル化	74
6.4 検証実験	76
6.5 考察	81
6.5.1 既存のポリゴンモデル化手法との比較	81
6.5.2 形状や構造の違いによる精度や品質の比較	81
6.5.3 維持管理への利用における評価	81
6.5.4 制限事項	82
6.6 結論	
第7章 結論	84
7.1 本研究のまとめ	84
7.2 今後の展望	85
参考文献	86
謝辞	

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 土木構造物維持管理の現状

日本において、橋梁や堤防などの既設土木構造物の維持管理が重要な問題となっている. この問題の背景として、高度成長期に建造された膨大な土木構造物の老朽化がある.それら 全ての土木構造物を同時期に建て替え更新することは現実的でない.そのため、適切な維持 管理を通して、土木構造物の長寿命化を図り、戦略的に更新を行うことが求められる.土木 構造物の維持管理の一般的な手法は、目視や打音による点検を行い、その結果をもとに危険 性の緊急度や重要性を評価し、危険ですぐさま修繕すべきであると判定された土木構造物 の指定箇所を修繕することで行う.人々が頻繁に行き交う、使用頻度の高い土木構造物は、 高い頻度で点検を行う.また、土木構造物やその部材の種類に応じて、危険度の指標も変化 する. 点検の内容はコンクリートの劣化や耐荷重評価が主である.ダムでは付帯構造物であ る水門やポンプ、通信網も点検する. 点検結果の記録は2次元図面や紙媒体で行う事例が多 い.

しかし,紙媒体の台帳や2次元の図面による維持管理には複数の課題が残されている.ま ず2次元の図面は熟練の技術者でない限り視覚的に3次元でのイメージを捉えることが容 易でない.また,紙媒体管理での課題点として,紛失の恐れや情報の散逸がある.人口減少 が社会的な問題となっている日本において,維持管理に割り当てられる人員は減少するこ とが予想されることから,誰もが理解可能な形式で維持管理できることが望まれる.

1.1.2 土木構造物維持管理の電子化のための取り組み

土木構造物維持管理の効率化の問題を解決するため、土木構造物の維持管理の電子化に 関する取り組みが進んでいる.電子化により、情報の散逸を防ぐことができるだけでなく、 経年変化の把握などが容易になる.電子化に関する取り組みの中でも、対象の土木構造物を 3 次元モデルとして表現する手法は対象を視覚的に把握する利点を持つ.3 次元モデルは、 稜線のみで構成される「ワイヤーフレームモデル」、稜線とそれが作る平面で構成される「サ ーフェスモデル」、サーフェスモデルの内部も考慮された「ソリッドモデル」の3種類に分 類される.サーフェスモデルの中でもその構成される平面が三角形(三角メッシュ)であり、 かつ XYZ 座標で定義されるものを「ポリゴンモデル」と呼ぶ.また施工、点検の情報を電 子データとして記録することで経年変化の考察やデータの分類を容易に行うことが可能に なり、加えて紛失や見逃しの危険性も低下する.三上ら¹⁾は鋼道路橋の維持管理支援を行う ために、Web ベースの3 次元モデルライブラリシステムを開発した.清水ら²⁾は、寸法のな い模式図を検査と工事で共通に用いるために、3次元モデルを活用した橋梁維持管理や点検 や修理を管理するための展開図を容易に作成できるシステムを開発した.田原³は、関係者 間のコミュニケーションの円滑化、工事監理業務の効率化、施工の品質・安全性向上に繋げ ることを可能にするために、建設構造物の3次元モデルを施工段階で活用し、施工状況を可 視化させるシステムを開発した.これらの研究を通じて効率的な維持管理を実現したが、そ れぞれのシステムのデータ形式はシステム独自のものであることなど、他のソフトウェア との互換性がないことが問題に挙がる.そのため、維持管理のための一元化された3次元モ デルや電子データが必要になる.

そこで, 建築物の施工から維持管理までの情報を, 3 次元モデルに属性情報が付与された, 3 次元プロダクトモデルに集約させることを目的とした BIM (Building Information Modeling) ⁴⁾を土木構造物に応用させる CIM (Construction information modeling) を, 国土交通省が提唱, 推進を開始した⁵⁾. プロダクトモデルは主に IFC (Industry Foundation Classes)⁶形式に統一 して定義される. これはオブジェクト指向に倣い, 3 次元モデル内で属性を定義したり, 橋 梁から具体的事例へと特化したり, 内部構造へと集約したりできるクラスを定義する. その ため, 多くの土木構造物の実例に対応できることが期待され, さまざまな提案や検討が進め られている. 日本の国土交通省は, 幾つかのプロジェクトにおいて, CIM を導入し, その検 証を行っている⁷⁾. CIM 化は主に可視化による理解度の向上や, 手戻りの削減に向上してい る.

1.1.3 CIM モデルの用途と作成手法

国土交通省が発行した「CIM ガイドライン」⁷⁾⁸⁾⁹⁾に基づき,CIM に用いる3次元プロダクトモデル(以下,「CIM モデル」と記載)の要件や活用例についてまとめる.

CIM モデルは3次元モデルと属性情報で大きく構成され,複数の種類がある.3次元モデ ルは道路中心線や構造中心線を表現する「線形モデル」,切土,盛土を表現した「土工形状 モデル」,現況地形を表現する「地形モデル」,構造物を表現する「構造物モデル」,地質ボ ーリング柱状図,表層地質図,地質断面図等の地質・土質調査の成果を表現した「地質・土 質モデル」,数値地図(国土基本情報)等の対象地区を含む広域な範囲の地形モデル,建屋 等の3次元モデルである「広域地形モデル」,これらを統合した「統合モデル」に分類され, 本研究では「構造物モデル」に注目する.構造物モデルの外形形状を示す3次元モデルは, 3次元 CAD で作成されたソリッドモデルを想定しているが,現在は3次元 CAD での利用 が容易なサーフェスモデルも対象にしている.また3次元モデルをどこまで詳細に作成す るかの指標である詳細度が設定された.詳細度は100,200,300,400,500の5段階で設定 されている.100の場合は対象を記号や線,単純な形状でその位置を示し,200の場合は構 造形式が確認できる程度の形状を有した3次元モデルになる.300の場合は附帯工等の細部 構造,接続部構造を除き,対象の外形形状を正確に表現し,400の場合は附帯工,接続構造 等の細部構造及び配筋も含めて,正確にモデル化する.500の場合は現実の構造物と同一に なるように3次元モデルを作成する.構造物モデルの詳細度は,設計,施工,維持管理によって必要とされる基準が異なり,維持管理では最低200である必要がある.

橋梁やシールドトンネル,港湾など各種土木構造物を対象とした CIM モデルの定義が行われ始めている¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾.他にも,CIM モデル作成のためのコストと使用用途の最適化を測る指標としての詳細度の検討¹³⁾¹⁴⁾や,クラックや剥落などの変状に対しての CIM モデルの研究¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾も実施されている.

既存の土木構造物に CIM に基づく維持管理手法を導入するにあたり, CIM モデルをどの ように作成するかが課題となる.新規土木構造物については,設計段階にて 3 次元 CAD ソ フトウェアで作成したものがそのまま利用できるため問題はない.しかし,既存土木構造物 には CIM モデルに相当するものが用意されていない場合,新たに作成する必要がある.2 次 元の図面から 3 次元 CAD ソフトウェアを用いて手動作業で作成する手法が現在主に使用さ れているが,多くのコンポーネントを持つ土木構造物の 3 次元モデルを手動生成すること は手間が大きく,また熟練者でない場合は図面から構造物の形状を把握することが容易で ない.そのため,既設土木構造物の 3 次元モデルの自動生成や 3 次元情報の自動取得が大 きな課題になる.

1.1.4 3次元計測点群データの技術

土木構造物の 3 次元情報を自動で取得する手段として、レーザスキャナや写真測量で計 測した 3 次元の点集合(以下、「点群」と記載)の利用に注目が集まっている.点群の例を 図-1.1に示す.点群には直交座標で定義される座標位置や RGB 値で定義される色の情報 や反射強度の情報などが含まれ、点群を利用することで対象の 3 次元情報を自動で獲得で き、かつ 3 次元モデル化の有効な手段として期待される.以下、計測手法と活用事例の現状 について述べる.



図-1.1 3 次元計測点群データ

(1) レーザスキャナを用いた点群計測技術

レーザスキャナで点群を取得する手法は対象の表面にレーザを照射し,対象の位置情報・ 色情報を点群で取得する.位置情報はレーザ発射口から対象までの距離を計算することで 求められる.レーザは表面にしか照射されないため,物体の内部は照射されず,前方に障害 物がある場合はその後方の部分の点群は取得されない.またレーザ光が屈折,吸収される水 面,鏡面,黒い物体には適していない.本論文では前方に障害物があったため点群が取得で きなかった領域を「欠損」と呼ぶ.

レーザスキャナは取得手法として大きく3種,機材として2種に分類される.まず取得 手法はTime of flight 方式,位相差方式,三角測量方式に分類される.それぞれの距離を計算 する手段と利点を表-1.1に示す.Time of flight 方式は、レーザが照射されてから反射して 戻ってくるまでの時間を利用して、対象物体の位置を求める.何100、何1000メートルほ どの長距離の計測が可能であり、広範囲の測量を得意とする.位相差方式は、複数に変調さ せたレーザの拡散反射成分の位相差を用いて、対象との距離を求める.1秒間に取得できる 点数が多く、短時間での計測を可能にする.三角測量方式は、三角法で対象の位置を求める. 最も精度が高いが、数メートル先しか計測できないため、小型の対象の測定に適している.

名称	Time of flight 方式	位相差方式	三角測量方式
手法	反射時間	波長の位相差	三角法
利点	遠距離測定	高速測定	近距離を高精度

表-1.1 レーザスキャナの計測手段

次に,機材としては固定式と MMS(Mobile Mapping System)に大きく分類される.固定 式は名前のとおりレーザスキャナを三脚で固定して点群を取得する.レーザスキャナは水 平方向に 360 度, 鉛直方向に 180 度の範囲で連続的に回転し, 対象にレーザを照射する.レ ーザの照射箇所を原点と定義し、物体の位置座標を定義する.局地的な計測に適しており、 取得される点の密度は 2~5cm である. レーザスキャナの真下の部分の点群は取得されない. MMS はレーザスキャナと車載カメラ, GPS (Global Positioning System), IMU (Inertial Measurement Unit)を配置した車両を時速 30~40km で走行させることで、より広範囲の点 群の取得を可能にしている. GPS と IMU を利用することで, 車両の移動によってレーザス キャナの位置が変更されても、対象の位置座標を補正することが可能になる. 車両の速度が 上昇すればするほど、取得される点群の密度が低下する. MMS は固定式と比較して密度が 10cm 程度と低く, 車両の発進や停止などで速度が変更する事態が不可避な点や GPS の精度 に依存する点より,固定式より精度が劣りやすい.更に、レーザスキャナを飛行物体に取り 付けて, 高所から測量を行う手法もある. 航空測量は航空機に地形に対して垂直方向にレー ザスキャナを,そして位置情報を取得するために GNSS (Global Navigation Satellite System) 測量機,IMU を取り付け,主に地形の標高の計測を行う¹⁸⁾. これは広範囲な地形の計測に 適しており、点密度は 50cm~1m である.近年では複数の入射角が異なるレーザスキャナを 取り付けることで高さ情報だけでなく、建築物の側面など、3次元的にデータを計測するこ とも可能になった.しかし,航空測量は詳細な計測には向かない.そこでドローンなど UAV (Unmanned Aerial Vehicle)を使用した測量が行われている¹⁹⁾. 主な土木構造物の計測例と して、道路は MMS、ダムは固定式、トンネルは MMS や固定式が両方使用され、地形は航

空測量を用いる例が多い.このように計測する対象に応じて,使用するレーザスキャナを選 択する.

(2) 写真測量を用いた点群計測技術

次に、写真測量による点群の取得について述べる.写真測量は複数の視点から対象物を撮影した 2 次元のデジタル写真から対象の空間情報を作成する手法である.複数の写真内の 共通の特徴点を対応付けることで、それぞれの写真の撮影場所を推定し(Structure from Motion²⁰),撮影場所と特徴点の距離を計算する.写真測量でも対象物の前方に障害物があ ると、その後方の点群が取得できない「欠損」の問題がある.また特徴点の取得が容易でな い、コンクリート壁などの無地の長大な平面に計測も適しておらず、全方向から撮影した写 真が必要になる.高価なレーザスキャナと比較して、写真測量は安価な市販のデジタルカメ ラの写真を用いて点群や 3 次元モデルを作成することが可能である.撮影したデジタル写 真に位置情報が付与されていないと、ローカル座標系が定義されるため、実際の位置情報や スケールと差異が生じる.このように、写真測量で得られた点群は、レーザスキャナに比較 すると精度は劣る.Dai らはレーザスキャナと写真測量の性能を比較し、誤差が 10cm 以内、 完全性が 80%以上の条件の時には写真測量を使用する方が有効であると結論付けた²¹).

実際に写真測量を使った土木構造物の計測事例は以下のようなものがある.藤井らは神 奈川県横須賀市の旧横須賀製鉄所第1号ドライドックの写真測量を行い,石材表面の侵食 量を計測した²²⁾.絶対座標を取得するために,TS(Total Station)での測量を併用した.大 石らは UAV を用いて海岸堤防の写真測量を行い,ひびわれ,亀裂,たわみなどの変状を抽 出した²³⁾.

(3) 点群の活用事例の現状

点群は対象の現状の情報を短時間で計測できることから,主に建設業界で活用される事 例が多い.異なる日程に同じ地点を計測することで,災害の被害状況や施工後の土量など, 状況の比較を行うことができる.計測点群を用いて,建築物の高さや奥行きを測定すること も可能である.また色情報を有する性質を利用して,Virtual Reality (VR) やシミュレーシ ョンなどの視覚的表現として活用する事例がある²⁴.

点群は図-1.2に示すように、1 行に各点の情報が格納されたデータセットとして取得する. この特徴は1 ピクセルごとに情報が格納された2 次元画像と類似しており、そのため幾何学的な形状処理アルゴリズムに点群を適用した事例も数多く存在する. 以下、その例を示す. これらのアルゴリズムは Point cloud library²⁵⁾という点群処理のライブラリや、 MeshLab²⁶⁾や CloudCompare²⁷⁾というフリーソフトで実装されている.



図-1.2 点群のデータ形式

(3-1)計測点群の品質を補正する手法

レーザスキャナ,写真測量で計測した点群に共通して,欠損が生じる問題や,逆にノイズ が生じる問題,レーザの照射ロやカメラレンズからの距離により点密度にばらつきが生じ る問題がある. Rashidi と Brilakis はこれらの問題に対応する手法について研究した²⁸⁾.具 体的な内容は,ノイズの除去,欠損の補完,密度の一律化である.

(3-2) 点群をセグメンテーションする手法

計測した点群は点の集合として1つのデータで保存される.そのため,面などの意味のあ るオブジェクトに分離する手法(セグメンテーション)も存在する.セグメンテーションは, 画像²⁹⁾³⁰,メッシュ³¹⁾,点群³²⁾に対して多くの研究が行われている.セグメンテーション の基本的な方法は,輝度や曲率などをもとに入力データの連続性が途切れている場所を探 索することにある.そこがセグメンテーションの境界になる.例えば,領域成長法³³⁾や流域 アルゴリズム³⁴⁾はある1点(シード点)からユーザが定義した基準(法線やデプス値の違 い)をもとに領域を拡張する.領域の境界線が曖昧なときは,数理最適化が使用できる.例 えば,動的輪郭モデル³⁵⁾やレベルセット法³⁰はエネルギー最小化で境界を計算する.グラ フカット法³⁷⁾はグラフ構造で隣接関係を定義し,そのグラフを最小で分割するようにセグ メンテーションを行う.また平面など指定の形状をランダムに当てはめる試行を繰り返し, それに対しての距離が閾値以下の点数が最も多いときの結果をセグメンテーション結果と して採用する RANSAC 法³⁸も使用される.

(3-3) 点群を用いた形状探索手法

3次元形状探索手法は、検索する物体と検索される物体、それぞれの特徴量を求め比較す ることで行う.検索対象は物体全体または一部、剛体または姿勢変化する物体である.大渕 はクエリの全体と検索対象モデルの全体を形状で比較する手法を全体検索、それ以外の、部 分をクエリとしてその部分を含む全体を検索したり、全体をクエリとしてその全体に含ま れる部分形状を持つ全体を検索したりする手法を部分検索と定義した³⁹⁾.また大渕は、特 徴量を見かけの特徴量・幾何特徴量・位相特徴量の3種に大別した.点群を用いて求める特 徴量は幾何特徴量に該当する.全点対の距離の1次元ヒストグラムを利用するD2特徴⁴⁰⁾、

全点対の距離に加えて捻り角を追加した長さと角度の2次元ヒストグラムを利用する AAD 特徴⁴¹⁾,捻り角に代わって点対の線分と法線のなす角を利用する長さと角度の2次元ヒス トグラムを利用する Shape context descriptor⁴²⁾がある.また3次元画像を2次元画像に変換 し,SIFT⁴³⁾や SURF⁴⁴⁾特徴量を用いる例もある.

点群を利用した3次元形状の検索手法の例として、以下のような研究が行われている. Nan らの手法は屋内の点群をまず領域成長法を用いて面のセグメントに分割し、位置関係を もって椅子, 机など意味ある1つのオブジェクトになるよう複数の面をマージし, その後事 前に作成したデータベース内のポリゴンモデルから,それと最も特徴量が類似したものと 置換する 45). この手法は倒れた椅子など,オブジェクトが本来あるべき姿勢になっていな い場合は、間違ったオブジェクトのポリゴンモデルを置換する課題点がある.また、点群で なくポリゴンモデルの頂点を利用しているが、ポリゴンモデルを用いた部分検索も幾つか 提案されている. Guy らは, 事前にコンポーネントごとに分割されているポリゴンモデルを 対象に手動で指定したコンポーネントの特徴量を Shape Context descriptor で算出し,それを 基に類似したコンポーネントを検索した⁴⁶⁾. Attene らの Fast Reject Schema は, ポリゴンモ デルがコンポーネントごとに分割されている必要がない内部の部分検索手法である ⁴⁷⁾. 全 頂点内で点を1つ作成し, その中の代表点をシード点として設定した. それらの点を中心に した半径が同一の球を作成しその内部を 1 つの領域と定義することで事前にコンポーネン トごとに分割する処理を省略した. Guy らと同様に Shape Context descriptor で球内の物体の 特徴量を算出し, 類似していない部分を除去することで類似した部分を検索した. また, ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム ⁴⁸⁾や SVMs (support vector machines) ⁴⁹⁾⁵⁰⁾も類似の領 域を見つけるために使われている.

(3-4)対称軸・中心軸検出

スケルトンとは、物体の中心を通る線である⁵¹⁾.スケルトンの計算方法には、中立軸変換 ⁵²⁾を用いる方法、対称性を利用する方法などがある.

中立軸は、「形状に内接する円(球)の中心点の集合」によって定義された形状表現の一つである.しかし、中立軸変換は、入力形状が内外を区別できるソリッドモデルである必要があり、点群から計算するには、曲面再構成が必要となる.

対称性を用いた方法では、局所的な対称面(軸)を点群の法線を用いて計算する. Tagliasacchi らの手法では、ある面を用いて点群の断面を求め、その断面の点の法線の延長線の交点を求めることでスケルトンの候補点を計算する⁵³⁾.この手法は、数点の断面の点からスケルトンの候補点の推定が可能なので、欠損に対して頑健である特徴を持つ.この手法は曲面構造のオブジェクトの点群に対しては有効であるが、平面で構成されるオブジェクトには適さない. Vanna らの手法は点群データ内の点で軸を挟んで反対側となる対蹠点

(antipode)を見つけ、それらの中点をスケルトンの候補点と設定している⁵⁴⁾.この手法は、 対象が平面で構成されたオブジェクトであっても、適切にスケルトンを検出している.上記 の手法は3次元モデルや3次元点群に対しての中心軸の検出方法であるが、2次元画像の対

称軸を計算する手法も提案されている. Mitra らの手法では,2次元画像内のピクセルに対して対をつくり, Hough 変換を用いてその線分と直交する直線とX軸の成す角と長さのヒストグラムを求め,高い頻値の点対の垂直二等分線を対称軸と定義した⁵⁵⁾.

1.2 研究の目的

本研究の目的は、土木構造物の点群から維持管理に利用できる CIM モデルを自動生成す ることである.既往の研究調査を通じて現状の課題点や改善を要する点についてまとめ、そ れらを解決するような CIM モデル化手法を開発する.そして実在する土木構造物の計測点 群に手法を適用させ、その結果やそれに基づく研究の目的の達成度について考察を行う.

1.3 論文の構成

本論文は,全7章で構成した.本論文の構成を図-1.3に示す.

第1章では,研究の背景として土木構造物維持管理と点群計測・処理技術の現状を整理し,研究の目的を述べる.

第2章では、既往の研究および本研究の新規性について述べる.既往の研究については、 点群から BIM/CIM/as-is モデルを生成する研究、点群からポリゴンモデルを生成する研究に ついて整理する.それらを踏まえて、既往の研究に対する本研究の目標・新規性を述べる.

第3章では、本研究で開発した3種類の3次元モデル化手法の概要について述べる.

第4章では、橋脚のような類似した構造を持つ土木構造物に対して有効な、幾何学的類似性に基づいた3次元形状検索・テンプレート置換による3次元モデル化手法について述べる.

第5章では、レールのような規格化された断面を有するスイープ構造に対して有効な、ス ケルトン検出・断面押し出しによる3次元モデル化手法について述べる.

第6章では、トンネルのような複数の鉛直断面を有する構造に対して有効な、複数の断面 を連結させることによる3次元モデル化手法について述べる.

第7章では、結論を述べる.



第2章 既往研究

2.1 点群から BIM/CIM/as-is モデルを生成する手法

BIM や CIM に点群を適用させるためには、点群を構造に応じて分離し、更に分離した点 群に壁や床、柱といった属性(エンティティ)を付与する必要がある.建設物の計測点群を このように処理したモデルを、ここでは as-built モデルと呼ぶ. Pătrăucean らはこの工程を 3 種類に分類した ⁵⁰.

まずは、対応する設計モデルが存在する場合、それを利用することで as-built モデルを生成する手法である.設計モデルに対してサンプリングで点を散布し、入力点群と位置合わせを行う.その後設計モデルのエンティティと最も近い点をクラスタリングすることで、as-built モデルを生成する.

しかしながら,既設構造物は設計モデルを有していない場合が多い. その場合は2通りの 方法が考えられる. 1 つ目の手法は点群内の局所的なエンティティを持つ領域を入力して, その情報を利用して他のエンティティもボトムアップに決定する手法である. 例えば 1 本 の柱のエンティティが与えられた場合,それに垂直に隣接する高度の低い面は床であると 言える. そしてその床に対して平行な面は天井であり,垂直な面は壁であると言える. この ようにしてエンティティを追加する. 2 つ目の手法は入力点群を RANSAC 法や領域成長法 などのセグメンテーションアルゴリズムを用いてセグメントに分割し,位置関係を利用し てそれらにエンティティを定義する. 例えば「床は低い位置にあり,かつ天井と並行,壁と 垂直に位置する」という性質を利用する. 現在提案されている手法の多くは最後に述べた手 法にあてはまる.

BIM では対象である建築物の多くは平面(壁,床,天井など)と柱状物体(柱,梁など) が平行もしくは垂直に位置して形成されている.この性質を利用して,まず入力点群を平面 のセグメントに分割し,その後位置関係と高度を利用して対応したエンティティを定義す る手法が多い.Xiong らは屋内の点群を壁,床,天井,その他に分類しラベル化した⁵⁷⁾. Wang らはブラインド窓や外壁,内壁,屋根など更に細かい分類を行っている⁵⁸⁾.更に Armeni らは広大な屋内建造物の点群を,個々の部屋に分類した後,部屋内の家具の分類も行ってい る⁵⁹⁾.また家具などにより壁や床はオクルージョンが生じやすく,その後ろの部分は欠損 になりやすいことも建築物の点群の特徴としてあげられる.これはその周りの点群がどの セグメントに属しているかで補完することが可能である.

一方 CIM では、建築物と異なり、土木構造物は一元化された形状、構造でない. そのため、前述した BIM のための as-built モデル生成手法の流用が困難であり、道路や橋梁、プラント内の配管など、対象を特定しての取り組みが多い. まず、道路の点群に対する as-built モデル生成手法について述べる. 道路の計測点群には主に路面、街路樹、電柱が含まれる. 路面の点群は平面の特徴を有するため、主に高度の低さや分散の低さを利用して検出でき

る. そのため、都市の点群を指定された等間隔にグリッド分割して、高低差や最低点の座標 値を利用して, 路面の点群が含まれたグリッドを推定して除去する. Ishikawa らは 3 次元グ リッドごとの高さ方向の分散を算出し、分散の値が閾値以下のグリッドを路面と判断して 除去した ⁶⁰⁾. Yi らは 2 次元グリッド内の最低高度の点と残りのグリッド内の点との高低差 を算出し高低差が閾値以上の点を路面と判断して除去した⁶¹. Mananahar らは3次元グリッ ドごとの高さ平均を算出し、閾値以下のグリッドを路面と判断して除去した⁶²⁾.いずれの 手法においても,平坦な道の路面は十分に摘出されたが,坂道の路面摘出は適切な結果が得 られていない. 街路樹や電柱は、どちらも柱状物質であるが、街路樹は枝分かれし、横に広 がった構造を持つ. 道川らはこの性質を利用して, 独自に作成したミニマムスパニングツリ ーを基に、街路樹と電柱を区別した⁶³⁾.一方、Fukano らは MMS が取得する点群の軌道を 利用して電柱や街灯を検出した⁶⁴⁾.次に,橋梁についての手法を説明する. Walsh らは橋梁 の点群を部材ごとに分離させた ⁶⁵⁾. この手法では面のセグメントで分割した点群を, コー ナーとエッジをもとに、1つのコンポーネントの点群にマージさせている.同じ橋梁を対象 に、塚田らは地上レーザスキャナと UAV を用いて橋梁の点群を取得し、上部工と下部工に 分離された橋梁のソリッドモデルを作成した 60. この手法は点群の断面を取得することで 上部工と下部工の3次元モデルをそれぞれ生成している.最後に,配管について説明する. プラント内部は多くの配管が入り組んでおり、レーザスキャナでこれを取得すると、計測さ れた点群内には欠損が多く含まれ、そのまま3次元モデル化すると不完全である. 松岡・増 田はこの問題を解決するため、パイプの円柱形状と他の部材の位置関係を利用した.まずパ イプと平面部のみ自動で検出し、残りのティーやエルボなどの細かい部材は位置関係を基 に推定してソリッドモデルを作成した の. 実際の配管との適合率は約80%で、ティーやエ ルボの部分は約 60%であった. Czerniawski らは、プラントの計測点群から、曲率をもとに パイプ構造を検出し、ソリッドモデルに置き換えた 68).しかし、自動生成が可能な形状は平 面や円柱などのプリミティブ構造のみで,対応できる範囲が狭く,欠損に対応できない課題 がある.

2.2 点群からポリゴンモデルを生成する手法

次に、点の集合である点群からポリゴンモデルを変換する手法について説明する.点群は 計測物の表面の点のみ取得されるため、サーフェスモデルの一種であるポリゴンモデルに 変換する手法が大半である.点群の局所領域から面を推定することでサーフェスモデルを 生成する.これは曲面再構成問題⁶⁹⁾として知られており、点群内の法線情報を利用して、陰 関数を求めることで近似曲面を推定する.陰関数を定義する手法は、距離関数⁷⁰⁾や、放射既 定関数⁷¹⁾⁷²⁾⁷³、ポアソン方程式⁷⁴⁾⁷⁵⁾などがある.また陰関数を定義する手法の他にも、半径 *r*の球を転がし接する点を連結することでポリゴンモデルを生成するαシェイプ法⁷⁶⁾や、*r* が無限大のとき、全ての点を内包する凸多角形のポリゴンモデルを生成する凸包⁷⁷⁾も存在 する.また、点群から直接ポリゴンモデル化する手法だけでなく、点群から高さ、長さ、半 径などのパラメータを取得し、そのパラメータを基に点群の形状と類似したプリミティブ 構造の3次元モデルに置換する手法もある⁷⁸⁾.

点群から生成されたポリゴンモデルは、多くのドロネー三角メッシュで形成される.これ らはデータ量が非常に大きくなり使用する PC によっては動作が悪くなる点や、構造物の稜 線が正確に表現できない欠点がある.福田らは模型を用いた建築物の検討のために、これら をレーザスキャナで取得した点群データを、幾何学的なポリゴンモデルに変換する手法を 開発した⁷⁹⁾.最小二乗法を用いて点群から平面を検出し、それを凸包でポリゴンモデル化 する.その後各平面の境界線を計算する.この手法は凸多角形な面だけでなく、凹多角形な 面にも対応しており、平面のみで構成される構造物に対しては効果的であるが、曲面に対応 できない課題がある.

2.3 本研究の新規性

土木構造物の計測点群から自動で CIM モデルを生成するためには、点群を曲面再構成の アルゴリズムに適用させる前に対象の構造に即したセグメンテーションを行う必要がある. 形状や構成が類似している建築物と異なり、土木構造物は形状や構成が多種多様であるた め、その構造物の性質に適したセグメンテーション手法が必要になる.しかし、既存手法は 平面や円柱などプリミティブな形状のみ自動認識が可能で、対応できる土木構造物の範囲 の狭さが課題になる.プリミティブでない形状であってもはじめに平面のセグメントに細 かく分割し、その後複数のセグメントを 1 つのコンポーネントにマージさせる手法もある が、この手法は欠損が含まれていると適切なセグメントを選出できない可能性があること や、数多くあるコンポーネント 1 つ 1 つに対して処理を行う必要がある課題がある.また 曲面再構成による点群からポリゴンモデルを生成する手法は細かい三角メッシュで構成さ れたポリゴンモデルが生成され、データ量の大きさや稜線が正確に表現できない問題があ る.平面のみで構成された構造物の点群を最低限な面数と適切な稜線で構成されたポリゴ ンモデルに変換する手法も存在するが、曲面に対応することは不可能なため、曲線構造を持 つレールやトンネルに対しても同様のポリゴンモデルを生成する手法が必要である.

本研究では土木構造物の計測点群から自動で CIM モデルを生成する既存手法の課題を解 決する3種類のポリゴン化手法を開発したことに新規性がある.1つ目の手法は,橋脚のよ うなプリミティブ形状でないコンポーネントを効率よくかつ高精度に認識,検出し,かつ欠 損のある領域を補完するために,1つのコンポーネントをテンプレートに置換し,それと類 似した領域を3次元検索技術により検出し,対応したテンプレートポリゴンモデルと置換 するものである.2つ目の手法と3つ目の手法は,レールやトンネルのような曲線構造を持 つ点群から,最低限な面数と適切な稜線で構成され,かつ欠損のある領域を補完したポリゴ ンモデルを生成するために,オブジェクトの中心を通る軸(スケルトン)を検出し,それに 沿って断面を押し出すことでポリゴンモデルを生成するものと,複数の断面を連結させる ことでポリゴンモデルを生成するものである.

第3章 研究の概要

3.1 開発手法の概要

本研究では既往の研究調査から得られた,土木構造物計測点群から自動で CIM モデルを 生成するうえでの課題や未着手点を解決するために,3 つのポリゴンモデル化手法を開発した.

まず、土木構造物計測点群から橋脚のようなプリミティブでないコンポーネントを認識 してポリゴンモデル化する課題に注目する.複数の平面のセグメントを選出してマージさ せる手法は、コンポーネントが多い場合同じ処理を繰り返す手間があり、欠損が含まれてい ると適切なセグメントを選出できない可能性がある.そこで、土木構造物内には類似した構 造が多い性質を利用して、対象のコンポーネントのうちの1つをテンプレートポリゴンと して置換し、3次元検索技術を用いてテンプレートポリゴンと類似した領域を探索し、そこ にテンプレートポリゴンを位置合わせで配置する手法を開発した(第4章).これにより同 ー工程の省略や欠損への頑健性向上を実現させる.また坂道上の橋脚のように高さや形状 がわずかに異なるコンポーネントに対して、テンプレートポリゴンの形状を一致させるフ ィッティング処理も開発した.

次に、点群から生成されるポリゴンモデルの面の構成についてである.これは最低限の面 数で構成されかつ対象のオブジェクトの稜線を正確に表現することが求められる.このよ うな条件を満たすポリゴンモデルを生成させる手法は存在するが、平面のみで構成された 構造物のみに対応しており、曲面が含まれた構造物に対しては有効な手段が開発されてい ない.また点群には欠損が含まれやすく、従来のポリゴンモデル化手法ではこの欠損が反映 されたポリゴンモデルが生成されてしまう.この問題に対して、オブジェクトの中心を通る 軸(スケルトン)を検出し、それに沿って断面を押し出すことでポリゴンモデルを生成する 手法(**第5章**)、複数の断面を連結させることでポリゴンモデルを生成する手法(**第6章**) を開発した.

以上の手法は固定式レーザスキャナと MMS から取得した土木構造物の点群を対象とす る. 生成されるポリゴンモデルの精度と詳細度の要件は,精度は CIM ガイドライン内に明 確な要件が示されていないため「Poisson surface reconstruction でポリゴンモデル化したもの と同程度」と,詳細度は CIM ガイドライン内の要件に基づいて「200 以上」とする.提案手 法によりオブジェクト認識,ポリゴンモデル化が可能と判断される土木構造物の種類につ いて,既存手法も含めたものも表-3.1に示す.本提案手法が実装可能な土木構造物に対し ては,対応した章番号を記載し,既存手法により対応可能なものは,該当する文献の第1著 者名を記載した.橋脚を対象にした既存手法は,複数の平面のセグメントをマージさせるこ とで1つの橋脚とみなしているため,点群から直接,橋脚の領域を認識,検出には至ってい ない.

構造物種類	オブジェクト認識・分類	ポリゴン化
建築物	Xiong ら ⁵⁷⁾ , Wang ら ⁵⁸⁾ , Armeni	福田ら ⁷⁹⁾
	ら ⁵⁹⁾	
路面	Ishikawa 6 ⁶⁰⁾ , Yi 6 ⁶¹⁾ ,	Kazhdan $\overset{\circ}{\triangleright}$ ⁷⁵⁾ , Edelsbrunner $\overset{\circ}{\triangleright}$ ⁷⁶⁾
	Mananahar ら ⁶²⁾	
坂道		Kazhdan $\overset{\circ}{\triangleright}$ ⁷⁵⁾ , Edelsbrunner $\overset{\circ}{\triangleright}$ ⁷⁶⁾
電柱	Michikawa ら ⁶³⁾ , Fukano ら ⁶⁴⁾	第5章,第6章
配管	松岡ら ⁶⁷⁾ , Czerniawski ら ⁶⁸⁾	松岡ら ⁶⁷⁾ , Czerniawski ら ⁶⁸⁾ , 第
		5章,第6章
港湾構造物	第4章	第4章,第6章
橋脚	Walsh ら ⁶⁵⁾ , 塚田ら ⁶⁶⁾ , 第4章	第4章,第6章
橋梁		
レール		第5章
トンネル		第6章
ダム		

表-3.1 本提案手法と既存手法が対応可能な土木構造物

3.2 開発環境

本研究ではこれらの提案手法の有用性を検証するために、一般的なデスクトップ PC 上で C++と PCL (Point Cloud Library)²⁵⁾を用いてシステムの実装を行い、固定式レーザスキャナ や MMS (Mobile Mapping System) で測定した複数の実在する土木構造物の点群を用いて検 証実験を行い、考察を行う.まず、実験に使用したデスクトップ PC の環境を表-3.2に示 す.次に、検証実験に用いた点群を取得した機器についての説明を行う.本研究では1種類 の固定式レーザスキャナと2種類の MMS を用いて土木構造物の点群を計測した.各ケース スタディに用いたレーザスキャナの対応を表-3.3に示す.

СРИ	Intel (R) Core (TM) i7-3770K CPU @ 3.50GHz 3.90 GHz	
メインメモリ	32.00GB	
GPU	AMD Radeon HD 6800 Series	
OS	Windows 8 Enterprise (64bit)	
開発環境	Microsoft Visual C++ 2013 for Desktop (32bit)	
使用ライブラリ	Point Cloud Library (PCL) 1.8.0 (32bit)	
使用言語	C++	

表-3.2 システムの開発環境

堤防	三菱モービルマッピングシステム	高精度 GPS 移動
	計測装置	
モノレール	三菱モービルマッピングシステム	高精度 GPS 移動
	計測装置	
トンネル(直線構造)	FARO focus3d x330	
トンネル(曲線構造)	FARO focus3d x330	
トンネル(緊急停車位置あり)	Leica Pegasus: Two	

表-3.3 ケーススタディ計測に用いたレーザスキャナの分類

第4章 3次元検索技術と位置合わせを利用したポリゴン モデル化手法

本章では、土木構造物が類似した繰り返し構造を有する点に着目した、3次元検索技術で 類似領域を探索し、そこに対応したポリゴンモデルを位置合わせで配置することで、効率的 なポリゴンモデル化を行う手法について述べる.

提案手法では、1 つの入力点群から、幾何学的類似性に基づいて部材ごとに分離された複数のポリゴンを生成する.この手法は 4 つの大きなステップを持つ.提案手法の流れを図-4.1に示す.まず、入力点群の前処理を行う(4.1節).次に、検索キーである部材の点群を用いて、入力点群内から類似した領域を探索し、その後、発見した類似領域を入力点群からセグメンテーションする(4.2節).最後に、セグメンテーションされたそれぞれの類似領域に対して部材のテンプレートポリゴンモデルを配置する(4.3節).このとき使用される検索キーの点群とそれに対応したテンプレートポリゴンモデルは、3 通りの手段から生成される(4.4節).次節より、これらの詳細を述べる.



図-4.1 提案手法の流れ

4.1 入力点群の前処理

範囲の広い平面(路面や壁面など)や長大な構造(レールなど)は、本章の提案手法でポ リゴンモデル化する対象でない.そのため、自動または手動でセグメンテーションする.自 動でセグメンテーションする手法の例としては、RANSAC法³⁸⁾や領域成長法³³⁾、高さや法 線の閾値を利用したセグメンテーションが挙げられる.図-4.2に前処理の例を示す.この 図に示された点群は、範囲の広い壁面と路面があり、これらを領域成長法で検出している. 図内の青と緑の点がそれぞれ該当する.



図-4.2 点群の前処理の結果の例

4.2 局所的三次元マッチングを用いた類似領域検索とセグメンテーション

本ステップでは、入力点群内から、検索キーの点群と類似した領域を見つける.本ステッ プの流れを図-4.3に示す.類似度を比較する領域は、入力点群内の点を中心にしたバウン ディング球(以下、「バウンディング領域」と記載)で定義し、入力点群内のすべての点に 対して総当りで比較を行う.領域定義に球を用いる理由は、検索するコンポーネントの領域 のサイズと方向が特定されていないためである.点数が多く、点の密度が高い場合は、計算 時間を減少させるために、隣接した点が生成するバウンディング領域はほぼ一緒であると 仮定して、中心にする点は任意の等間隔でサンプリングする.バウンディング球の半径は検 索する類似領域のサイズに合わせて定義する.



別のソフトウェアで作成したテンプレートポリゴンモデルは、点群とスケールや座標系 が異なる場合があるため、OBB(Oriented Bounding Box)⁸⁰⁾と主成分分析により求める第1 主成分ベクトルを利用して自動でスケールと座標系を補正する.スケールと座標系の自動 補正の概要を図-4.4に示す.これは入力点群から対象の部材1つの点群を自動もしくは 手動で抽出して行う.ターゲット点群、テンプレートポリゴンモデルそれぞれに対してOBB を定義して、3辺の長さ h_i, w_i, d_i, h_i, w_i, d_iを求める.OBB を作成するために、ターゲッ ト点群、テンプレートポリゴンモデルに対して主成分分析を使用して、第3主成分ベクトル までを計算する.その後重心とターゲット点群、テンプレートポリゴンモデル内の点が作る ベクトルと、各主成分ベクトルの内積を求め、最大と最小の差分を求めることで3辺の長さ が計算できる(図-4.5).その後、テンプレートポリゴンモデルに対して、対応した3辺の 比率、

 $\frac{h_t}{h_i}, \frac{w_t}{w_i}, \frac{d_t}{d_i}$

を乗じることでスケーリングを行う.このとき座標系が異なっていると,第1成分の単位ベクトルも大きく異なっていることが仮定できる.それを利用して,座標系の補正を行う.テンプレートポリゴンモデルの第1主成分ベクトルがターゲット点群のそれと同一になるように,重心を基準にテンプレートポリゴンモデルを回転させる.





図-4.5 OBB の定義方法

類似度は特徴量を比較することで計算する.特徴量は中心点 **p** からの距離 l (式(1)) と, その線分と法線 **n**_iのなす角 θ (式(2))の 2 次元ヒストグラム H (**図**-4.6), すなわち Shape context descriptor⁴²⁾で計算する.類似度 *s* は式(3)を用いて求める.*N* はヒストグラムのビン の数であり,*h*は *H*内の 1 つ分の値である.*s* は 0~1 の値で表され,値が大きい方が類似 度は高く,1 の場合は完全に一致している.**図**-4.7 に類似度評価の例を示す.ある領域と キー点群の特徴量の類似度 *s* の値がユーザの設定した閾値 *s*_{sim} 以上の場合は,その領域は類 似とみなされる.



図-4.6 Shape context descriptor で使用する長さと角度の指標

$$l = \|\mathbf{p} - \mathbf{q}_i\| \tag{1}$$

$$\theta = (\mathbf{p} - \mathbf{q}_{i}, \mathbf{n}_{i}) \tag{2}$$

$$s(H^{1}, H^{2}) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{h_{ij}^{1} \times h_{ij}^{2}} \quad (0 \le s \le 1)$$
(3)



図-4.7 類似度評価の例

複数の種類の類似部材が存在する土木構造物の点群を入力した場合は、セグメンテーションを行った後の点群を用いて改めて類似領域を検出することを繰り返す.

この手法は、検索する部材の間隔が狭かったり、高さが微妙に異なったりする場合は、適切な結果が得られない場合がある。検索する部材の間隔が狭いと、1つのバウンディング球内に2つ以上の部材が含まれたり、不要な点群が大量に含まれたりする恐れがある(図-4.8(a)).一方、高さが微妙に異なると、バウンディング球内に部材の全部分が含まれない可能性がある(図-4.8(b)).その際は、入力点群と検索キーの点群を2次元に変換して、2次元の descriptor⁴²⁾を用いてマッチングを行う。これにより、バウンディング円の半径が球のときより小さくなるため、余分な点を取得することを防げ(図-4.8(c))、また高さ情報が失われるため、高さが微妙に異なる類似部材も適切に検出できるようになる(図-4.8(d)).



図-4.83次元の点群を用いたマッチングの問題点と,2次元に変換した点群を用いた解決方法

4.3 類似領域へのテンプレートポリゴンモデルの配置

3.2節で探索した類似領域に対して、部材のテンプレートポリゴンモデルを配置する.本 ステップの流れを図-4.9に示す.まず、テンプレートポリゴンモデルと類似領域の重心を 用いて平行移動で大まかに位置合わせを行う.次に ICP アルゴリズム ⁴⁸⁾を用いて精緻に位 置合わせを行う.ICP アルゴリズムとは入力点群の点 p_iとターゲットの点群内の点 q_i間の 距離の総和を最小にする変換行列R・tを計算するアルゴリズムである(式(4),図-4.10). ICP はノイズが含まれていると、位置合わせ後のテンプレートポリゴンモデルに傾きが生じ る(図-4.11 (a)).この問題を解決するために、Date らの手法⁸¹⁾を参考にして、土木構造 物が従来地面に対して垂直に位置している前提条件で、ICP で用いる点群とテンプレートポ リゴンモデルを 2 次元に変換することで回転の自由度を 1 に制限した.これにより、テン プレートポリゴンモデルの傾きを防止できる(図-4.11 (b)).



図-4.9 位置合わせの流れ



図-4.10 ICP アルゴリズムの図解

$$\frac{1}{N} \sum \|\mathbf{q}_i - R\mathbf{p}_i - t\|^2 \to \min.$$
(4)



⁽a) 従来の ICP を用いた配置の結果



⁽b) 回転の自由度を1に制限した ICP を用 いた配置の結果

図-4.11 3 次元の点群を用いた位置合わせの問題点と、2 次元に変換した点群を用いた 解決方法

土木構造物によっては一見類似していても、高さなどがわずかに異なっている部材も存 在する.そのような土木構造物に対して、1つのテンプレートポリゴンモデルを配置するだ けでは、形状を一致させることは困難である.そこで、点群と形状を一致させるために、フ ィッティング処理を開発した.フィッティング処理によって、高さなど類似領域間のわずか な差分を補えるだけでなく、テンプレートポリゴンモデルの手動生成を精密に行う必要が なくなり、効率化に貢献できる.この処理は点群の平面と対応が付けられ、かつポリゴンモ デルの頂点が対応するオブジェクトの角にあたるものだけであるテンプレートポリゴンモ デルを対象にしている.

フィッティングは、部材の点群内の点 p_i と, p_iから最も近いテンプレートポリゴンモデ ル内の面 *f_c*(p_i)と間の距離 *d* の総和 E(V)を最小にするように、テンプレートポリゴンモデル の頂点を移動させることで行う(式(5)).しかし、頂点を移動させるたびに面の情報が変化 するため、その度に点群内のすべての点との距離を再計算すると、膨大な時間がかかる.そ こで、形状の特徴を変化させないようにポリゴンモデルの面数を減らすために用いるアル ゴリズム、QEM (Quadric Error Metrics)⁸²⁾に基づいたフィッティング処理を開発した.この 手法では点群を面の集合に置き換え、テンプレートポリゴンモデルのある頂点の周りの面 についての距離を最小にするような座標に、頂点を変換する.

$$E(V) = \sum_{\mathbf{p}_{i \in c}} d(\mathbf{p}_i, f_c(\mathbf{p}_i)) \to \min.$$
(5)

まず、領域成長法や RANSAC 法を用いて類似領域の点群 C_{si}を面 p_{Cseg}にセグメンテーションして(図-4.12)、テンプレートポリゴンモデルの面 *f*_M と対応をつける.対応付けを行う面の条件は、テンプレートポリゴンモデルが点群に十分に位置合わせされていると仮

定して、ポリゴンの面を基準に並行でかつ近傍の点群の面、つまりそれぞれの面の法線ベクトルのなす角が θ_{cor} 以下であり、かつそれぞれの面の距離が d_{cor} 以下であり、複数該当する場合は値が最小のものが該当する(図-4.13 (a)).例えば、図-4.13 (b)内の赤色の面と対応した点群の面の候補は、まず赤円で囲んだ2つの法線を有する面になる.そのうち赤色の面との距離がより短い方が対応した面に当たる.その後、テンプレートポリゴンモデルの頂点 v_Mを、その頂点周りの面 f_{around}(i)とそれに対応した点群の面 C_{around}(f_{around}(i))との距離(式(6))が最小になるように移動させる工程を繰り返す.式(6)中の area(C_{around}(f_{around}(i)))はC_{around}(f_{around}(i))の点数、n は法線ベクトルを意味し、d は C_{around}(f_{around}(i))の重心が c のとき、 $d = -\mathbf{c} \cdot \mathbf{n}$ である.式(6)を v について微分し、極小値を求めると、 $\mathbf{v}' = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$ となり、この時の v[']が、Q(v)が最小になるための v の座標値である.全ての頂点に対しての頂点周りの面と対応した点群との誤差の総和が e 以下になったとき、フィッティング処理を終了する.

例として,フィッティングさせる点群を図-4.14 (a)に,フィッティングするポリゴン ポリゴンを図-4.14 (b)に示す.フィッティング処理を行った結果が図-4.14 (c)である. このように,手動で作成した単純な形状のテンプレートポリゴンモデルを,点群の形状に一 致させることができる.



(a) シード点定義



 (b) シード点と類似した特 徴の点を追加
 図-4.12 領域成長法の図解



(c) 最終結果



この手法は、オクルージョンなどが理由で点群内の面数が不十分である、具体的にはある 頂点に対してその頂点周りの面に対応した点群が3面未満であると(図-4.15(a))、適切 な頂点が計算できない(図-4.15(b)).レーザスキャナや写真測量で点群を計測する場合、 このような事例が高確率で発生することが予想される.この問題を解決するために、凸包を 用いて擬似的に面を定義する.頂点周りの面に対応した点群(図-4.15(c))を用いて、凸 包を実行する.それにより、点がない部分に擬似的に面が生成される(図-4.15(d)).こ の手法によって、オクルージョンなどが理由で面が十分に取得されていない点群に対して もフィッティング処理が対応できる(図-4.15(e)).





4.3.1 位置合わせ後の誤差計算方法

位置合わせの工程を終えた後、テンプレートポリゴンモデルが対応した点群にずれるこ となく配置されているか定量的に評価するために、誤差を計算する.自動もしくは手動で、 テンプレートポリゴンモデルを配置した点群の、対応した部材のみの領域でセグメンテー ションし、その各点からのテンプレートポリゴンモデルの最近傍距離を、全点において計算 する.点群とテンプレートポリゴンモデルの間で、局所的に大きな差分が見られる場合もあ り、最近傍距離が正規的に分布しない例もある.そのような場合にヒストグラムを作成する と、2つの山が現れる.このような指標を適切に表現するために、2つの山のうちより大き な度数を持つ山の平均値と標準偏差を「標準誤差」、もう1つの山の平均値と標準偏差を「局 所誤差」と定義して計算する.局所的な差分がない場合は最近傍距離が正規的に分布するた め、「標準誤差」のみ計算される.また点群内の点からテンプレートポリゴンモデルまでの 距離では、テンプレートポリゴンモデルの頂点が点群外から離れているとき、適切な誤差が 計算されないため、テンプレートポリゴンモデル内の頂点から点群までの最近傍距離を求 め、同様にそれの平均値と標準偏差を「ポリゴン誤差」、局所的なものを「ポリゴン局所誤 差」として追加する.

4.4 3種類のテンプレートポリゴンモデル生成手法

類似領域を見つけるために使用する検索キーの点群と、それに対応した、類似領域に配置するテンプレートポリゴンモデルは、3種類の手法から生成される.1つ目と2つ目は、別

ソフトウェアを用いて事前に生成する.写真測量で生成した点群を検索キーの点群として 使用し,同様の手法で生成したポリゴンモデルをテンプレートポリゴンモデルとして使用 する手法と(4.4.1項),3次元 CAD ソフトウェアで作成した3次元モデルをテンプレート ポリゴンモデルとして使用し,その3次元モデルの面上に擬似的にサンプリングした点を 検索キーの点群として使用する手法である(4.4.2項).事前に用意されたテンプレートポリ ゴンモデルが存在しない場合は,検索キーの点群を入力点群内から定義し,テンプレートポ リゴンモデルは既存の曲面再構成手法で生成する(4.4.3項).次項より,これらの詳細を述 べる.

4.4.1 写真測量

この手法では、写真測量²⁰⁾で生成した点群を検索キーの点群として使用し、同様の手法 で生成したポリゴンモデルをテンプレートポリゴンモデルとして使用する.写真測量での 点群,ポリゴン生成の図解を図-4.16に示す.状況に応じて,不要な点や三角メッシュを 自動または手動で除去する.入力点群とスケールや座標系が異なる場合は,4.2節で示した スケーリング手法を使用して一致させる.



) 京群 (C) ホリコン モデル

図-4.16 写真測量を用いた点群とポリゴンモデル生成

4.4.2 3次元 CAD モデル

この手法では、3 次元 CAD ソフトウェアで対象部材の写真や点群、図面を目視して、手動で作成したポリゴンモデルを使用する.3 次元 CAD ソフトウェアでの点群、ポリゴンモデル生成の図解を図-4.17に示す.入力点群とスケールや座標系が異なる場合は、4.2 節で示したスケーリング手法を使用して一致させる.3 次元 CAD ソフトで生成したポリゴンモデルは面数、頂点数が少なく、頂点のみでは特徴量を求めるのに不十分なため、Poisson

disk sampling⁸³⁾を用いて面上に擬似的に点をサンプリングしたものを検索キーの点群として使用する.



4.4.3 セルフマッチング

セルフマッチングでは、入力点群内から検索キーの点群を定義し、テンプレートポリゴン モデルは既存の曲面再構成手法で生成する.

検索キーの点群はバウンディング球を用いて自動的に定義する.このとき特徴の大きな 領域を検索キーに定義するために、バウンディング球の中心点は、入力点群内の角の点から ランダムで選出する.角の点は Harris 特徴量⁸⁴⁾を用いて求める.**図-4.18**に示すうち、赤 い点が特徴点に該当する.



図-4.18 Harris 特徴量に基づいて検出された特徴点

また、セルフマッチングでは、事前に検索する類似領域のサイズが決定されていないため、 バウンディング球の半径の値を試行錯誤しながら総当りで各領域の類似度を計算すること は非常に効率が悪い.そこで、効率化を図るため、Fast reject scheme⁴⁷⁾を利用する.はじめ は入力点群(図-4.19 (a))内からキー点群を定義するためのバウンディング球の半径を 小さく設定し(図-4.19 (b))、明らかに類似していない、類似度が *s*_{sim} 以下のバウンディ ング領域を比較対象から除外する. その後バウンディング球の半径を増加させ,同様の工程 を繰り返す(図-4.19 (c)). 最後まで残ったバウンディング領域が類似領域であり(図-4. 19 (d)), それぞれセグメンテーションを行う(図-4.19 (e)).



(e) 最終的な類似領域図-4.19 Fast reject schema による類似領域検索

テンプレートポリゴンモデルは類似領域の中で最も特徴量の平均値に近いものを代表に 設定し、それを Poisson surface reconstruction を用いて自動でポリゴンモデル化する.代表の 点群とそのポリゴンモデル化の結果の例を図-4.20に示す.以降,4.3節で示した手法で 類似領域にテンプレートポリゴンモデルを配置する.



4.4.4 3種類の手法の比較

表に前述した3種類の手法の利点,欠点を表-4.1に示す.写真測量は高い密度と詳細度 を持つ, as-is なテンプレートポリゴンモデルが作成できるが,全方位からの写真撮影が必 要であり,事前に用意した部材の領域しかモデル化されない.3次元 CAD モデルはテンプ レートポリゴンモデルを作成するコストが低く, すぐに BIM や CIM モデルに使用できる利 点があるが, フィッティング処理は複雑な形状には対応が難しく, また事前に用意した部材 の領域しかモデル化されない. セルフマッチングは事前にテンプレートポリゴンモデルを 作成する必要がないが, 生成されるポリゴンモデルは, 入力点群の密度や精度など, 品質に 大きく依存する.

手法	利点	欠点
写真測量	● 詳細度が高い3次元モデルが	● 全方位からの写真が必要
	生成できる	● 事前に用意した部材の領域し
	 ● 実データでのテンプレーポリ 	かポリゴンモデル化されない
	ゴンモデルトが扱える	
3 次元 CAD モデル ● フィッティング処理により精		● フィッティング処理は複雑な
	緻にテンプレートポリゴンモ	形状には対応が難しい
	デルを作成する必要がない	● 事前に用意した部材の領域し
	● テンプレートポリゴンモデル	かポリゴンモデル化されない
	を作成するコストが低い	
	● すぐに BIM や CIM モデルに	
	使用できる	
セルフマッチング	● 事前にテンプレートポリゴン	● ポリゴンモデル化の精度が入
	モデルを作成する必要がない	力点群に依存する
	● 入力点群内の全ての類似構造	
	が検出できる	

表-4.1 3種類の手法の利点と欠点

4.5 検証実験

提案手法を実装し、2 つの Case study に適用させることで、提案手法の有用性の検証を行った.

1つ目は兵庫県西宮市鳴尾川付近の堤防(4.5.1項)である.2つ目は大阪モノレール彩都線(万博記念公園駅〜彩都西駅区間)のモノレール(4.5.2項)である.どちらも類似した構造が,地面に対して垂直に立ち並んでいる.Time of flight 方式のレーザスキャナを搭載した同じ MMS で点群を取得した.

4.5.1 堤防

堤防は長さ約 100m, 高さ約 3m であり,防壁を支えるための2種類の形状のリブが規則 的に配置されている(図-4.21). 点群は 2014 年 1 月 10 日午前 8 時に取得した.計測点 数は 1,107,956 点, ピッチは約 3cm で, 検証実験に使用した点群はこのうち 141,270 点である(図-4.22). また手前にある看板の影響で, 右から 5 番目にあるリブの点群は一部取得 されていない.

Chen ら¹²⁾が定義した港湾構造物の3次元プロダクトモデルの構成を参考にして、「正解」 に設定した3次元モデルの構成を示す(図-4.23).





図-4.22 堤防点群



図-4.23 本検証実験で設定した正解の構成

前処理として、堤防の防壁と路面の点群は領域成長法を用いて検出し、平面のポリゴンモ デルに置換した.提案手法では、入力点群内からリブを検出、ポリゴンモデル化し配置する. そこで最後に残る看板は Poisson Surface Reconstruction を用いてポリゴンモデル化する.以 下、3 つの手法の結果をそれぞれ示す.

(1) 写真測量

Photoscan⁸⁵⁾を用いて,30枚の写真で図-4.24 (a)に示すテンプレートポリゴンモデルを, 29枚の写真で図-4.24 (b)に示すテンプレートポリゴンモデルを生成した.まず,リブ小 のテンプレートポリゴンモデルを入力して,類似領域を検出した結果が図-4.24 (c)であ る.次に類似領域として検出されなかった点群に対して,リブ大のテンプレートポリゴンモ デルを入力した.検出された類似領域は図-4.24 (d)に示すとおりである.それぞれの類 似領域に対応したテンプレートポリゴンモデルを配置した結果が図-4.24 (e)である.図-4.24 (c)に示すように,リブ小である領域が1つ検出されておらず,リブ大である領域が 1つ誤検出された.その結果,リブ小である領域が1つポリゴンモデル化されなかった.こ れは対象の点群に欠損が含まれていたからである.このような問題を解決する手段として, 固定式レーザスキャナや写真測量の併用が考えられる.



(a) リブ小のテンプレートポリゴンモデル (b) リブ大のテンプレートポリゴンモデル



(2)3次元CAD

SketchUp⁸⁶⁾を用いて目視で簡易的な形状のポリゴンモデルを 1 つ生成した(図-4.25 (a)). その後 MeshLab²⁶⁾の Poisson Disk Sampling 機能 ⁸³⁾を用いて,図-4.25 (a)のポリゴン モデルの面上に点をサンプリングした(図-4.25 (b)). これを入力した結果 15 個全ての リブが類似領域として検出され(図-4.25 (d)),位置合わせを行った後,フィッティング 処理によって形状を近似させた.それにより,1つの入力テンプレートポリゴンモデルのみ で,2種類の形状を表現することができた.簡易的な形状のテンプレートポリゴンモデルを 入力したため,図-4.25 (c)に示すような結果になった.最終結果は図-4.25 (e)である.


図-4.25 3 次元 CAD での結果(堤防)

(3) セルフマッチング

この検証ではまず入力点群から特徴点を検出し,それらからランダムにバウンディング 領域の中心点を選出した.まず,リブ小の点群を検索キーにして,類似領域を検出した結 果が図-4.26 (a)である.次に類似領域として検出されなかった点群に対して,リブ大の 点群を検索キーにした.検出された類似領域は図-4.26 (b)に示すとおりである.検索キ ーの点群は図内の緑色の領域である.それぞれの類似領域で代表の領域をポリゴンモデル 化する(図-4.26 (c),図-4.26 (d))し,対応した類似領域に配置した結果が図-4.2 6 (e)である.



図-4.26 セルフマッチングでの結果(堤防)

まとめ

マッチングと位置合わせの工程においての,キー点群の点数,テンプレートポリゴンモデルの面数,計算時間,類似領域の検出の正解率,位置合わせにおける誤差を表-4.2,表-4. 3,図-4.27に示す.表-4.2中のsは,類似度の閾値であり,sより類似度が高い領域は類似とみなす.図-4.27内のリブの番号は,左から順番に指定している.表-4.4に示すように,検索に用いたテンプレートポリゴンモデルと正しく類似している領域とそうでない領域での類似度の差は,セルフマッチングを用いた場合は約10%の差があるが,写真測量と3次元CADでテンプレートポリゴンモデルを生成した場合は大きな差が見られなかった.また大小のリブによってこの結果に大きな差は見られなかった.

まず,計算時間について説明する. セルフマッチングは特徴点の検出に最も時間がかかった. テンプレートポリゴンモデルの面数,頂点数は,マッチングの計算時間には比例しないが,位置合わせの計算時間には比例する. 次に,ポリゴンモデル化の精度について説明する. 3 次元 CAD を使った手法の誤差が最も小さいことから,フィッティングにより形状が点群に近似されていることが分かる. しかしながら,図-4.25 (c)に示すよう,簡易的な形状で表現されているため,局所的な誤差は大きくなっている. 一方,セルフマッチングと写真測量の誤差が3次元 CAD より大きい理由として,位置合わせの際にノイズを拾ったことで,テンプレートポリゴンモデルが壁面側に寄り,ずれが生じたことが考えられる.

		面数	頂点数	S	検出した類似領域		計算時間[s]
			(散布し		正	誤	
			た点数)				
安 古测具	リブ小	500,000	251,278	0.71	9	1	122.15
- 子 具側里	リブ大	699,999	351,423	0.71	4	0	56.94
3D CAD		8	6 (1,420)	0.62	15	0	91.26
セルフマッチング	リブ小	N/A	1,880	0.9	10	0	61.87
$(\mathcal{L})\mathcal{L} \neq \mathcal{Y} \neq \mathcal{Y} \neq \mathcal{Y} \neq \mathcal{Y}$	リブ大	N/A	2,834	0.8	5	0	40.55

表-4.2 マッチングの結果(堤防)

表-4.3 位置合わせの結果(堤防)

		検出した	フィッティング	計算時間	
		類似領域	させた領域	(1 領域ごと) [s]	
官直測具	リブ小	10	N/A	30.42	
- 万 兵侧里	リブ大	4	N/A	42.31	
3D CAD	全てのリブ	15	15	0.76+1.50	
セルフマッチング	リブ小	10	N/A	0.56	
	リブ大	5	N/A	0.72	

表-4.4 検索に用いたテンプレートポリゴンモデルとの類似度(堤防)

	入力テンプレートポリゴン	入力テンプレートポリゴン
	モデルと正しく類似した領	モデルと類似していない領
	域の類似度	域の類似度
写真測量	85%	84%
3D CAD	80%	N/A
セルフマッチング	93%	83%



(a) 写真測量



(b) 3 次元 CAD



図-4.27 誤差評価(堤防)

4.5.2 モノレール橋脚

モノレールの長さは約 7km である. モノレールは坂道上にも開通されており,橋脚の高 さ(橋脚の底面から上面まで)は場所によって異なり(最低 5m,最高 7m,図-4.28 (a)). また橋脚の形状は多くが T 字型であるが,一部 Γ 字型も含まれている(図-4.28 (b)).車 線は合計 2 車線で,橋脚は両者のレールを支えている. 点群は 2015 年 4 月 17 日午前 11 時 に取得した.計測点数は 36,330,307 点,ピッチは約 3cm で,検証実験に使用した点群はこ のうち 694,843 点である.また,細長いため図上では北部,中部,南部と分離して表示している(図-4.29,図-4.30)が,検証実験では分離せず,1つの入力点群として処理している.また Γ型の橋脚は赤の円で示している.

大阪府茨木市土木事務所から拝借したモノレール橋脚の図面を参照に、レーザスキャナ で照射される場所のみを対象にした、「正解」に設定した3次元モデルの構成を示す(図-4. 31).





(a) 高さがわずかに異なる類似した橋脚

(b) 異なる種類の橋脚

図-4.28 モノレール写真



図-4.29 取得した点群の範囲



図-4.31 本検証実験で設定した正解の構成

前処理で,路面と橋脚の上部のレールを検出し,路面は平面のポリゴンに置換し,レール は Poisson Surface Reconstruction でポリゴンモデル化する.提案手法は橋脚部分をポリゴン モデル化して配置する.本検証では,路面とレール部分の3次元の点群を入力すると適切な 類似領域が得られず,また路面とレール部分を除去しても,図-4.32のように,高さが異 なるため,適切な類似領域が得られなかった.そのため,入力点群は路面とレール部分を除 去し,かつ2次元化させたものを使用した.



図-4.32 3次元の点群を入力し、マッチングを行った結果

(1) 写真測量

Photoscan と 21 枚の 1 つの Γ 字型の橋脚と 36 枚の 1 つの T 字型の橋脚の写真を用いて, キー点群とテンプレートポリゴンモデルを生成した(図-4.33 (a),図-4.33 (b)).まず, Γ 字型の橋脚のテンプレートポリゴンモデルを入力して,類似領域を検出した結果が図-4. 34 (a)である.次に類似領域として検出されなかった点群に対して,T字型の橋脚のテン プレートポリゴンモデルを入力した.検出された類似領域は図-4.34 (b)に示すとおりで ある. それぞれの類似領域に対応したテンプレートポリゴンモデルを配置した結果が図-4. 34 (c)である. T型の橋脚が1つΓ型の橋脚のテンプレートポリゴンモデルと類似してい ると誤検出されてしまっている.



(2)3次元CAD

SketchUp を用いて目視でΓ字型とT字型の橋脚の簡易的なテンプレートポリゴンモデル をそれぞれ作成し(図-4.35 (a),図-4.35 (c)),MeshLabを用いて,ポリゴンモデルの 面上に点をサンプリングした(図-4.35 (b),図-4.35 (d)).まず,Γ字型の橋脚のテン プレートポリゴンモデルを入力して,類似領域を検出した結果が図-4.36 (a)である.次 に類似領域として検出されなかった点群に対して,T字型の橋脚のテンプレートポリゴンモ デルを入力した.検出された類似領域は図-4.36 (b)に示すとおりである.それぞれの類 似領域に対応したテンプレートポリゴンモデルを配置した結果が図-4.36 (c)である.フ ィッティング処理を用いたことで,他の2つの手法とは対照的に,橋脚の高さを一致させる ことができた(図-4.36 (b)).しかしフィッティング処理が適切に行えた橋脚は44本中 33 本であった.フィッティング処理が適切に実行されなかった理由は,+分に面にセグメ ーテーションできなかった,大きな欠損が含まれていたことが考えられる(図-4.37).一 見Γ字型であるが,わずかにT字型に近い形状の橋脚は,面の対応付けができたため,フ ィッティング処理が適切に実行された(図-4.38).





図-4.36 3次元 CAD での結果(モノレール橋脚)



図-4.37 フィッティング処理が適切に行われなかった点群の例





(a) 面ごとにセグメンテーションした点群 (b) フィッティング処理の結果 図-4.38 フィッティング処理が適切に行われた点群の例

(3) セルフマッチング

まず, Γ型の橋脚の点群を検索キーにして, 類似領域を検出した結果が図-4.39 (a)である. 次に類似領域として検出されなかった点群に対して, T型の橋脚の点群を検索キーにした. 検出された類似領域は図-4.39 (b)に示すとおりである. 検索キーの点群は図内の緑色の領域である. それぞれの類似領域で代表の領域をポリゴンモデル化する (図-4.39 (c), 図-4.39 (d)) し, 対応した類似領域に配置した結果が図-4.39 (c)である.



まとめ

マッチングと位置合わせの工程においての、キー点群の点数、テンプレートポリゴンモデ ルの面数、計算時間、類似領域の検出の正解率、位置合わせにおける誤差を表-4.5、表-4. 6、図-4.40、図-4.41、図-4.42に示す. 橋脚の番号は北から順番に指定しており、 また北部、中部、南部(図-4.29、図-4.30と対応)でグラフを分割した.表-4.7に示 すように、「型の橋脚を検索キーに用いた場合は類似している領域とそうでない領域での類 似度の差は10%程度だが、T型の橋脚を検索キーに用いた場合は1,2%しか差が見られない. そのため、「型の橋脚から先に入力する必要がある.また、すべての手法で、2D点群を用 いた場合は3D点群を用いたときより類似度が低くなった.次に、計算時間について説明す る.テンプレートポリゴンモデルの面数、頂点数は、マッチングの計算時間には比例しない が、位置合わせの計算時間には比例する.最後に、ポリゴンモデル化精度について説明する. セルフマッチングと写真測量は高さの差分を補正していないため、その領域の局所誤差が 大きく出ている.3次元 CAD のグラフ中、局所誤差が大きく出ている橋脚は、フィッティ ング処理が適切に行われなかったものである.フィッティング処理が適切に行われたモデ ルの誤差が低いことから、フィッティング処理により形状が点群に近似されていることが 分かる.

		面数	頂点数	S	検出した類似領域		計算時
			(散布した		正	影	間[s]
			点数)				
写真測量	Γ型	116,779	58,982	0.8	3	1	301.52
	T型	421,063	211,367	0.53	40	0	261.69
3D CAD	Γ型	24	14(7,349)	0.8	2	0	292.96
	T型	24	14(7,349)	0.58	41	1	240.97
セルフマッチング	Γ型	N/A	(8,084)	0.85	2	0	290.367
	T型	N/A	(5,201)	0.7	41	1	227.796

表-4.5 マッチングの結果(モノレール橋脚)

表-4.6 位置合わせの結果(モノレール橋脚)

		検出した	フィッティングさ	計算時間(1 領域ごと)[s]
		類似領域	せた領域	
写真測量	Γ型	4	N/A	7.89
	T型	40	N/A	26.12
3D CAD	Г型	2	2	0.82+1.64
	T型	42	33	1.22+1.85
セルフマッチング	Γ型	2	N/A	1.45
	T型	42	N/A	1.20

F1					
	入力テンプレ	ートと正しく	入力テンプレートと類似し		
	類似した領域	の類似度	ていない領域の類似度		
	T 字型	Γ字型	T 字型	Γ字型	
写真測量	91%	85%	90%	77%	
3D CAD	78%	81%	80%	70%	
セルフマッチング	95%	95%	93%	87%	

表-4.7 検索に用いたテンプレートポリゴンモデルとの類似度(モノレール橋脚)







(b) 中部



(c) 南部 図-4.40 誤差評価(モノレール橋脚,写真測量)











(c) 南部 図-4.41 誤差評価(モノレール橋脚,3次元 CAD)





(b) 中部



(c) 南部 図-4.42 誤差評価(モノレール橋脚, セルフマッチング)

4.6 考察

本節では、4.5節の検証実験で得られた結果をもとに、ポリゴンモデル化の精度や使用性など、現実の維持管理業務において適用できるかを考察する.

4.6.1 ポリゴンモデル化精度について

まず、マッチングにおいて、対象の部材をもれなく、かつ間違えを含むことなく検索でき ているのか考察する. 堤防は壁や路面の点群が入力点群として含まれていても, リブをもれ なく間違えを含まず検索できた.ただし、2種類の形状のリブを正確に分類することは困難 であった. モノレールはレールや地面が干渉していたり, 橋脚の高さが違ったりする理由で, レール部と地面部の点群を取り除き,2次元化させないと全ての橋脚が検出されなかった. また,橋脚にはΤ型とΓ型の2種類の形状があったが,Τ型を検索キーにした場合,一部 の Γ 型も一緒に類似領域に含まれた. またその逆の例もあった. 提案手法は複数のテンプ レートポリゴンが存在する場合,それらを同時に適用するのでなく,1つ入力して,類似領 域とみなされなかった点群を用いて改めて次のテンプレートポリゴンモデルを入力する手 法を採用している. Τ 型と Γ 型の橋脚のテンプレートポリゴンモデルを入力した際に, 類似 している領域とそうでない領域での類似度の差が異なっていたことから、テンプレートポ リゴンモデルを入力する順番によってマッチングの精度が異なる可能性があると考えられ る. この誤検出が見られた原因としては、計測点群の品質によるものと、本提案手法のアル ゴリズムによるものの両方が考えられる.類似性を評価する特徴量は、領域の中心からの3 次元情報(長さと角度のヒストグラム)から得られる. そのため計測点群内に欠損やノイズ が含まれていることにより特徴量に差が生じた例と、提案手法は領域を球で定義している ため対象のコンポーネント外の余分な点を含み、その結果3次元情報に差が生じた例が考 えらる. 前者の場合は対象の土木構造物のコンポーネントがコンクリートのみでなく, 金属 や木材も含まれている場合ならば、色情報や反射強度を追加の指標として利用することで、 後者の場合は類似領域検出の後処理として、周りの余分な点を除去する処理を加えること で解決できると見込まれる.

次に,位置合わせを用いて,見つけた類似領域にずれることなく配置されているのか考察 する.類似領域にノイズが多く含まれていたら,重心がずれるため,ICPの前の平行移動で ずれてしまい,本来の位置からずれて配置されてしまっていた.また,テンプレートポリゴ ンモデルと類似領域の Yaw 方向の回転角が大きく異なっていると,配置されたときもその 方向が補正されていなかった.そのため,事前にテンプレートポリゴンモデルを生成する場 合はスケールや座標系のみでなく,Yaw 方向の回転角も考慮する必要がある.

最後に,配置したテンプレートポリゴンモデルは点群の形状と一致しているのか考察する.3次元 CAD を用いた手法の誤差が最も低いことから,フィッティング処理を用いることで精度を向上させていることが分かる.しかし,フィッティングはかなり細かく,多くの

パラメータを設定する必要があり、類似領域であっても一律の閾値を設定できなかった. こ こでの閾値とは、「点群の平面を分割するためのパラメータ」、「点群とポリゴンモデルの面 を対応付けるためのパラメータ」の2つである.また、点群の面を正確にセグメンテーショ ンできるか、前工程の位置合わせでどれだけずれることなく配置されているかが、フィッテ ィング処理の結果に影響する.モノレール橋脚のT型を、T型に近似することは、点群とテ ンプレートポリゴンモデル間の面の対応をとることができなかったため不可能だった.逆 に、手動操作が加わっても、適切な面の対応をとることができれば、図-4.38のようにフ ィッティング処理が適切に行われる.また本検証実験では3次元 CAD で作成したテンプレ ートポリゴンモデルを入力した場合のみにフィッティング処理を適用させたが、写真測量 で作成したテンプレートポリゴンモデルを入力した場合やセルフマッチングを用いた場合 であっても、点群やテンプレートポリゴンモデルのサーフェスを適切に変換することがで きれば、同様にフィッティング処理を適用させられると期待する.しかしながら土木構造物 のコンポーネントの点群は、壁面や地面などの他のコンポーネントと接した面の点がオク ルージョンにより取得されないため、この問題を解決できる手法が必要になる.

4.6.2 既存のポリゴンモデル化手法との比較

提案手法のポリゴンモデル化の品質を評価するために、Poisson surface reconstruction で同 点群をポリゴンモデル化し比較を行った. 図-4.43 (a)は検証で用いたものと同一のモノ レールの点群を直接 Poisson surface reconstruction でポリゴンモデル化した結果であり、図-4.43 (c)はそのうちの3本の橋脚の点群(図-4.43 (b))で実装した結果である.これ らの結果より、MMSの計測データを直接ポリゴンモデル化させることは効果的でない.ま た、既存の点群から as-is モデルを生成する手法は、コンポーネントを1つ1つ認識、ポリ ゴンモデル化する.また平面やプリミティブ構造を検出する手法は対応できる構造物の種 類が限定される.一方提案手法は、複数の平面のセグメントをマージする処理をテンプレー トポリゴンモデル生成で簡易に置換している.テンプレートポリゴンモデルは手動生成が 必要な場合もあり、前処理も手動のものが必要な場合もあるが、複数の類似したコンポーネ ントを一度にポリゴンモデル化できる利点を持つ.これは多くのコンポーネントを持つ土 木構造物にとって有効な手法といえる.しかしながら、堤防、モノレール橋脚両者において も、Poisson surface reconstruction でポリゴンモデル化したポリゴンモデルの誤差である約 1cm よりも大きなものとなったため、精度に関しては改善が求められる.



(a) モノレール(福岡44本) (c) モノレール点(福岡3本) 図-4.43 Poisson surface reconstruction で直接ポリゴンモデル化した例

4.6.3 計測点群への頑健性

提案手法はテンプレートポリゴンモデルを配置することで点群の欠損を補える. 図-4.4 4に例を示す. どちらの例もオクルージョンや計測環境の問題で,計測点群に欠損が見られ る. Poisson surface reconstruction は欠損を補うことは可能であるが,欠損が大きい場合だと 面が破綻してしまう. 一方完全な形状のテンプレートポリゴンモデルを扱うことで,適切に 欠損を補うことができる. 欠損を持つコンポーネントの対応したテンプレートポリゴンモ デルとの類似度は,欠損のないものと比べると 5%ほど低かった. マッチングで類似領域と して検出できれば,重心を用いた粗い位置合わせを用いるため,正確な場所に配置でき,ま たフィッティング処理を用いることで形状を一致させられる.

また,看板などのクラッターがテンプレートポリゴンモデルの類似領域として誤検出される可能性が考えられる.これらを自動で除去するために,クラッターの形状はテンプレートポリゴンモデルと異なることを前提に,平均誤差を用いて間引くことが検討される.



提案手法は高さがわずかに異なる橋脚(図-4.45 (a))などを類似領域として検出する 場合がある.しかし、フィッティング処理を用いることで高さの差分を補うことができる

(図-4.45 (b)). フィッティング処理は点群とポリゴンモデルの平面の対応付けによって 行われるため,高さが極端に異なる場合は対応付けが適切に行われない場合がある. その際 は新たなテンプレートポリゴンモデルを用意する必要がある.



図-4.45 フィッティング処理を用いた僅かな高さの差の補正

4.6.4 アルゴリズムに関する頑健性

検証結果によると、極端に異ならない複数種類のコンポーネントを分類することが容易 でないことが考えられる.写真測量や3次元 CAD でテンプレートポリゴンモデルを生成し た場合は特にこの例に当てはまった.そのため、今後の課題として、複数のテンプレートポ リゴンモデルを同時入力すると、1つの領域に対して複数のテンプレートポリゴンモデルが 類似領域であると判定する可能性が考えられる.このような場合には、より類似度が高いも のを採用することが有効であると予想する.

提案手法は複数のステップで構成されている.マッチングの精度はその前の工程である 点群の前処理の精度が影響する.もしマッチングで余分な点も検出されると,位置合わせの 結果に悪い影響を与える可能性がある.例えばモノレールのケーススタディは,余分な点を 検出結果に含めないために,レールと地面の点群を事前に手動で除去する必要があった.自 動で除去する手法も存在するが,品質が良くない結果であった.これはモノレールが坂道上 に開通されているため,高さ情報に基づくセグメンテーションが容易でないからである.ま た,領域成長法を用いた平面検出は,地面の範囲が狭いために有効でなかった.

セルフマッチングでポリゴンモデル化する点群に余分な点が含まれていると、ポリゴン モデル化と配置の品質が悪化する.検証実験内でも、余分な点により位置合わせの品質が良 くない箇所があった.これは球を用いた領域定義を行っていることにより生じた欠点であ る.そのため、球で定義した領域に含まれた余分な点を除去する処理が必要である.

4.6.5 3つの手法の比較

提案手法では 3 つの手法を用いてポリゴンモデル化を行った. 検証実験を通じて得られた 各手法の利点, 欠点について考察する.

図-4.46に3つの手法の検証実験で得られた平均誤差,局所誤差の平均,計算時間を示 す.堤防は3次元 CAD の手法以外は局所誤差が得られなかったため,平均誤差のみ示す. 本検証実験では,フィッティング処理によりテンプレートポリゴンもデルの形状を点群と 一致させることが可能な3次元 CAD の手法が最も標準誤差が低くなった.



図-4.46 3つの手法の平均誤差と局所誤差の平均の比較

写真測量はテンプレートポリゴンモデルそのものの品質はいいが、写真測量自体の精度 の問題上スケールに差異が生じ、その影響でマッチングの精度が下がり、位置合わせの誤差 が大きくなる点と、マッチングや位置合わせの際、頂点のサンプリングを行わないと計算時 間が膨大になる点が問題である.大規模な土木構造物全体の計測データを精密にとること は非常にコストがかかる.対象の土木構造物が類似した部材が一定間隔で並んでいる構造 であるとき、写真測量で得られた1 つの高密度なテンプレートポリゴンモデルを他すべて の類似構造に適用できることは、大きな効率化の貢献になる.

3 次元 CAD テンプレートはフィッティング処理によって最も誤差が小さくなったが、複 雑な形状のテンプレートポリゴンモデルでは入力点群の品質が低い場合はフィッティング 処理を適用させることが困難である.現在、企業が開発、販売している BIM や CIM の属性 があらかじめ定義されている 3 次元 CAD モデルをテンプレートポリゴンモデルに使用でき れば、属性を追加することなくすぐに BIM や CIM に活用できることが期待される.

セルフマッチングは検索キーが入力点群内に存在するため,類似領域を検索する精度は 最も高いが,キー点群定義のためのパラメータ入力が多く,適切なキー点群が得られるまで 試行を繰り返す必要がある.また生成されるテンプレートポリゴンモデルも余計なメッシ ュを含んでいることが多いので取り除く必要がある.ポリゴンモデル化の精度が入力点群 に依存するため,マッチングのみセルフマッチングで行い,検出された類似領域は写真測量 や3次元 CAD で生成したものを代わりに使用する方法が有効であると考える.

4.6.6 維持管理への利用における評価

本提案手法で生成したポリゴンモデルやその面の構成は、維持管理に使うことに適して いるのか、足りない、もしくは余分に分割している部材があるのかについて考察する.

まず,1.1.3 項で示した,詳細度 200 の要件に関しては,土木構造物の大まかな構造を表 現できているといえるため満たしていると判断する.詳細度を 300 や 400 に達成させるた めには,支承など細かい部材もポリゴンモデル化する必要がある.これらは点群で取得が難 しく,また大規模構造の土木構造物全体の中で相対的に小さくなるため,セルフマッチング 法による分割は困難である.そのため,写真測量や3次元 CAD で作成したテンプレートポ リゴンモデルの詳細度を変更することで調整する必要があると考える.提案手法は一度テ ンプレートポリゴンモデルを類似領域に配置したならば,変換行列を得ることができるた め,後工程でそれを用いて異なるテンプレートポリゴンモデルに置き換えることが容易で ある.以上より,更新作業が含まれる維持管理業務に対して大きく貢献していると考える.

4.6.7 制限事項

提案手法には数点制限事項がある.1点目は、球を用いて領域を定義しているため、対象 のオブジェクト外の余分な点が含まれ、それが後の工程の品質や精度を下げる恐れがある ことである.縦に長いオブジェクトの場合,3.3節で示すように、領域を2次元に変換する 手法が使用できるが、この手法ですべての問題が解決できるわけではないため、球に代わる 新たな領域定義の手法もしくは球に含まれた余分な点を除去する処理が必要である. 球に 含まれた余分な点を除去する方法として, 点群のグラフ構造を利用し, そのグラフから一定 距離以上離れた点を余分な点とみなし除去する方法が考えられる.2 点目は、パラメータ、 特に類似度の閾値を手動で設定する必要があることである.現在は適切な値が得られるま でパラメータを変更させる試行を繰り返している. ある 1 つのバウンディング領域内の特 徴量は一定である性質や点群は隣り合った点の順にデータが並ぶ性質を利用して、入力点 群のすべてのバウンディング領域の特徴量のヒストグラムを計算し、二値化を用いて境界 を計算することやグラフの勾配を見つけることで類似度の閾値を推定できる可能性がある. 3 点目は、フィッティング処理は平面のみで構成されたオブジェクトのみに対応できること である. 曲面構造は多角形に近似できるため, 点群とポリゴンモデルを同じ多角形に近似さ せ、かつ平面の対応をつけることができれば、曲面を持つ構造にも対応できると考える.ま たフィッティング処理は、形状が複雑なものには対応できない. 4 点目は、類似した橋脚の 中の1本だけでっぱりがある(図-4.47内の赤い円で示した箇所)などの、わずかな違い に対応できない例があることである.これらは配置したポリゴンモデルからの誤差が大き くなると予想するので、距離の閾値で検出することができると考える. 最後に、 クラッター が誤検出される恐れがあることである. これらも同様に, 配置したポリゴンモデルからの距 離の閾値で検出できると考える.



図-4.47 提案手法が適用できないわずかな違いの例

4.7 結論

本章では、土木構造物内に類似した構造が多数ある性質を利用して、1つの部材のキー点 群と類似した領域を見つけ、そこにテンプレートポリゴンモデルを配置する手法を開発し た.キー点群とテンプレートポリゴンモデルは、3通りの手法で生成した.1つ目は、写真 測量を用いてキー点群とテンプレートポリゴンモデルを生成する.2つ目は、3次元 CAD を 用いてテンプレートポリゴンモデルを生成し、その面上に点をサンプリングしてキー点群 を生成する.3つ目は、入力点群内からキー点群を定義し、類似領域の代表の1つを既存手 法でテンプレートポリゴンモデル化させる.

MMS で取得した実在する 2 種類の土木構造物,堤防とモノレール橋脚の点群で検証実験 を行った.その結果,マッチングでは大まかに類似した領域が検出され,位置合わせはマッ チングで取得したノイズに大きく影響したものとなった.マッチングでは 2 種類のリブや モノレール橋脚を,明確に分類できなかった.また 3 種類の手法を使用することで,大規模 な土木構造物の高密度で,かつ高精度なポリゴンモデルの生成を可能にした. CIM モデル の要件は,精度は改善の余地が見られ,詳細度は要件を満たす結果になった.

提案手法で生成されるポリゴンモデルは,維持管理に利用するにおいては,テンプレー トポリゴンモデルの詳細度を調整することで,同じ土木構造物であっても複数の用途に利 用できるポリゴンモデルが生成できる利点がある.しかし高い詳細度また前処理やパラメ ータ入力など,手動操作が必要な場面も多く,これらの自動設定が行えられれば,さらに 効率化に貢献できると期待する.

第5章 スケルトンに沿った規格断面のスイープによるポ リゴンモデル化手法

前章では、土木構造物が類似した繰り返し構造を有する点に着目した効率的なポリゴン モデル化手法について述べた.本章では、レールなど、土木構造物に多く見られるスイープ 構造に基づいたポリゴンモデル化手法について述べる.レールは規格化された断面を、その 軌道に沿って押し出した構造をしている.本章はこの特徴を利用したポリゴンモデル化手 法を開発する.入力点群の中心を通る軸「スケルトン」を検出して、それに沿って規格化さ れた断面を押し出すことでポリゴンモデルを生成する.図-5.1に提案手法の流れを示す. 次節より、これらの詳細を述べる.



図-5.1 提案手法の概要

5.1 スケルトン検出

スケルトンとはオブジェクトの中心を通る線のことを指す.本研究では,平面で構成され たオブジェクトに対して有効な Vanna らの手法 ⁵⁴⁾を使用する. Vanna らの手法では,対蹠点 との中点をスケルトンの候補点にする.対蹠点 q_iとは,入力点群内の点 p_iと反対側にある 点を指し,距離 d_iが d_{min}以下で, p_iとの法線ベクトル n_iと q_iの法線ベクトル n (q_i)とのなす 角 θ_iが θ_{max}以上であるものである.(図-5.2).入力点群に欠損が含まれていると,対蹠点 を有していない可能性がある.



図-5.2 対蹠点とスケルトン候補点の決定方法

スケルトンの候補点 C_{s_ean}はばらつきがあり,点数も多いため(図-5.3 (a)),1本の軸に 近似する必要がある.曲線は細かい直線の集まりであると仮定すると,点群を局所的に分割 し,その主成分を求めることで,細かい直線に置き換えることができる(図-5.3 (b)).そ の際にばらつきやノイズがあると,計算したスケルトンが実際の構造の中心からずれてし まうため,ポリゴンモデル化した際,点群との間に誤差が生じる.そこで,外れ値の除去と ラプラシアン平滑化により,候補点群のばらつきを無くす(図-5.3 (c)).これは C_{s_ean}内 の点 p_{s_ean}を中心にした半径 *n*_{ap}の球(円)を定義し,その球内の点群で行い,これをすべて の点で繰り返す.平滑化後の点群の各点に対して,主成分分析を点群の部分集合に対して適 用して得られる近似直線上に投影することで,線状に分布する点群を計算する(図-5.3 (d)).これも同様に,半径 *r*_{PCA}の球内の点群で繰り返し行う.最後に,生成されるポリゴン モデルの面数,頂点数を最小限にするため,サンプリングにより,点数を間引く(図-5.3 (e)).主成分分析を使用した工程後の C_{s_ean}を図-5.3 (f)に,サンプリングを終えた最終工 程スケルトン C_sを図-5.3 (g)に示す.



(f) (d)を実行した後のスケルトンの候補点

(g) スケルトンの点(最終結果) 図-5.3 スケルトン候補点の処理

サンプリングの手法は等間隔に行う手法と,周りの部材を利用する方法がある.等間隔に サンプリングする手法は、図-5.4 (a)に示すように、まず $C_{s_{can}}$ の始点 $p_{s_{can}}(0)$ から、半径 r_{sample} の球(円)を定義し、その球内に含まれた点の中で最も遠い点を C_{s} に追加する.次に、 残った最も遠い点 $p_{s_{can}}(i)$ に対して同じ処理を行い、終点に到達するまで繰り返す.周りの 部材を利用する方法は、別個で周りの部材の点群かポリゴンモデルが必要になる.ここでは、 橋脚を使用した例を挙げる(図-5.4 (b)).はじめに、モノレール橋脚の点群もしくは3次 元モデルを XY 平面上に投影し、重心 c_i を求める.次に、スケルトンに垂直な面を、橋脚の 形状の特徴を利用して求める.橋脚はレールの進行方向に対して垂直な方向に伸びている. また、橋脚の点群は XY 平面上に投影すると長方形に近い形状になる.そのため、XY 平面 上に投影した点群に対して主成分分析を用いると、第1 固有ベクトルがレールの進行方向 に、第2 固有ベクトルがレールの進行方向に対して垂直な方向になる.この第2 固有ベク トル $v(c_i)$ と c_i を用いて面 $s(c_{v_i})$ を定義し、 $s(c_{v_i})$ との交点($s(c_{v_i})$ からの $p_{s_{can}}(i)$ 内 の最近傍点を、 $s(c_{v_i})$ 上に投影したもの)を $C_{s}(i)$ と定義する.これをすべての橋脚の点群も しくはポリゴンモデルについて行う.部材ごとにサンプリングを行うだけでは、オブジェク トの曲線構造を十分に表現できない場合がある.そのため,更にユニットごとに等間隔でサンプリングを行う.手法は前述した,始点から球を定義し,最も遠い点を追加するものと同様である(図-5.4 (c)(d)).



5.2 スイープ

断面はスケルトンの始点 $p_c(0)$ から開始する. その後, $p_c(i)$ が断面の重心と一致し, かつ断 面が $p_c(i)$ にあり, ベクトル $\overline{p_c(\iota)p_c(\iota+1)}$ と垂直な面上にあるように断面を移動する. そし て対応した頂点同士を連結することで面を生成する(図-5.5).



5.3 検証実験

モノレールの点群は4.5.2節で使用したものと同一である.レールと橋脚の間には上部構造の変形を吸収する支承と呼ばれる部材があり、レール部分は、中心部のコンクリート構造のレール、そのレールの両側面にある金属構造の側面レール、下に金属製の梯子状の足場と送電線がある(図-5.6,図-5.7).またレールには、橋脚の上部に継ぎ目があり、橋脚の間隔は約20mである.この点群のうちレール部分(8,096点,43,959点)を手動でセグメンテーションした(図-5.8,図-5.9).



図-5.6 モノレール写真



図-5.7 モノレールのレールの図解





断面は点群と写真,図面を目視して手動で生成したものを3種類の詳細度で用意した(図-5.10).サンプリングは第4章で生成したモノレール橋脚のポリゴンモデル(図-5.11)を利用して行い,更にユニットごとに等間隔にサンプリングを行う.サンプリングの間隔 *s*ample は、モノレール橋脚の間隔 20m に基づいて、10.0m、5.0m、2.5m、なしを設定した.





図-5.11 サンプリングに用いたモノレール橋脚のポリゴンモデル

図-5.12,図-5.13,表-5.1,表-5.2にポリゴンモデル化の結果を示す.比較対象 として,代表的なポリゴンモデル化手法である Poisson Surface Reconstruction⁷⁵⁾による結果を 図-5.14 (a)に,凸包 ⁷⁷⁾による結果を図-5.14 (b)に,Alpha shape⁷⁶⁾による結果を図-5. 14 (c)に示す. Poisson Surface Reconstruction は,欠損部に膨らみが確認できる.これは, MMS によって得られたモノレールの点群に欠損が多く含まれていたため,法線の推定が適 切に行われなかったことが原因である.凸包は欠損部の穴埋めはできているが,レールの曲 線構造が損なわれている.Alpha shape は,レールの曲線構造は保持している一方,欠損部 に凹みが発生している.一方,提案手法は,対象の構造がスイープ状であることを仮定する ことで,レールの曲線構造を反映させながら,欠損部を精度よく補完できていることが確認 できる.また,Poisson Surface Reconstruction と比較して,約0.05~30%の面数になったこと が確認できた.計算時間に関しては,本提案手法は比較対象の3つの手法より長くなった. その主な理由として,提案手法はスケルトンの検出のための計算時間が長いことが考えら れる.

*r*sample の値が大きい場合は、少ない面数でレールのスイープ構造を近似したポリゴンモデルが生成可能になる.一方、各ユニット内の曲線構造を反映していないため、ユニットが曲線構造であった場合に誤差が増加する.サンプリングの間隔を細かくすれば、曲線構造に対

応できる一方、レール部の点群が持つノイズや欠損に敏感になる(図-5.15).

カーブがある構造に関して述べる.1kmのレールの点群と *r*sample=5.0のときのポリゴンモ デル化の結果と比較すると,カーブが多い領域の平均誤差は 21.2cm,直線構造が多い領域 の平均誤差は 15.8cm であった.これより,カーブが多い領域は僅かながら精度が低下する.





図-5.15 生成されたポリゴンモデルの上下方向のずれと誤差の関係(赤:最小,緑: 最大)

	$r_{sample}[m]$	計算時間[s]	断面	頂点	面	平均誤差[m]
			Α	24	20	0.105
	未設定	1.709	В	72	60	0.108
			С	192	160	0.075
			Α	48	44	0.06
提	10	1.661	В	144	132	0.087
案			С	108	99	0.103
手			Α	104	100	0.055
法	5	1.649	В	312	300	0.055
			С	832	800	0.077
			А	148	144	0.097
	2.5	1.716	В	444	432	0.051
			С	1,184	1,152	0.058
		計算時間[s]	断面	頂点	面	平均誤差[m]
既	Poisson Surface					
存	Reconstruction	0.223	N/A	17,497	34,990	0.018
手	凸包	0.084	N/A	239	474	0.215
法	Alpha shape	0.334	N/A	8,096	86,964	0

表-5.1 120mのレール点群のポリゴンモデル化結果

	$r_{sample}[m]$	計算時間[s]	断面	頂点	面	平均誤差[m]
			Α	176	172	0.175
	未設定	29.078	В	528	516	0.187
			С	1,408	1,376	0.154
			Α	348	344	0.304
提	10	30.640	В	1,044	1,032	0.18.8
案			С	2,782	2,750	0.2
手			Α	592	588	0.156
法	5	30.163	В	1,776	1,764	0.187
			С	4,734	4,702	0.185
			Α	880	876	0.2
	2.5	30.030	В	2,640	2,628	0.156
			С	7,040	7,008	0.182
		計算時間[s]	断面	頂点	面	平均誤差[m]
既	Poisson Surface					
存	Reconstruction	1.542	N/A	11,794	23,492	0.426
手	凸包	0.242	N/A	152	300	0.503
法	Alpha shape	2.528	N/A	43,959	175,169	0.012

表-5.2 1kmのレール点群のポリゴンモデル化結果

5.4 考察

5.4.1 欠損やノイズ、モノレールの規模に対する頑健性

本実験の目的は、欠損やノイズ、長さやカーブの数、高低差などがポリゴンモデル化に与 える影響を検証することである。例えば、レールが長いと途中でスケルトンが途切れてしま わないか、カーブが多かったり高低差があったりすると曲線構造の連続性が損なわれない かなどについて評価した。

提案手法の頑健性は、スケルトン抽出の頑健性に依存する.上部に全く点がなかったり、 側面が大きな欠損がいくつも含まれていたりしても、スケルトンが取得できれば、図-5.1 2、図-5.13に示す通り欠損を補ったモデリングが可能である.しかし、スケルトンの候 補点S(ci)は大きな欠損の近くでは取得されていないため(図-5.16)、欠損の度合いが大 きいと、スケルトンの連続性を損なう可能性がある(図-5.17 (a)).このような場合は、 候補点S(ci)を利用して近似曲線を計算し、その近似曲線状に仮想的に点を作ることで、連 続性を保てると考える(図-5.17 (b)).

提案手法は,長大なモノレールの効率的なポリゴンモデル化に有効である.図-5.13 (b)

に 1km の長さを有したレールの点群をポリゴンモデル化した結果を示す. このように,長 大な点群であっても、スケルトンが途中で途切れることなく、レールのポリゴンモデル化を 実現している. ただし、120mのレールと比較して、1kmのレールには大きな点群と生成さ れたポリゴンモデル間の誤差が生じたことが確認できる(図-5.15). これは、点群に含ま れる欠損、ノイズによって、スケルトンの候補点が本来あるべき位置とずれが発生した結果 による. この結果より、本研究はスケルトンの候補点を局所的に平滑化したが、1本の滑ら かな曲線に近似させるために、全体的にも平滑化が求められると考えられる. またレール部 分をセグメンテーションした時のノイズの量によって結果が大きく依存されるため、ノイ ズが少ないレール部分のセグメンテーションが求められる. 一方、カーブや高低差があるよ うな構造に関して述べる. 1kmのレールの点群と *r*sample =5.0 のときのポリゴンモデル化の結 果と比較すると、カーブが多い領域(図-5.13 (a))の平均誤差は 21.2cm、直線構造が多 い領域(図-5.13 (a))の平均誤差は 15.8cm であった. カーブが多い領域に大きな欠損の 影響で 1m以上の誤差の領域(全体の約 5%)があることを考慮すると、直線構造とほぼ同 程度の精度であると言える.



図-5.17 近似曲線を利用したスケルトンの連続性の補正

5.4.2 スケルトンのサンプリング間隔とポリゴンモデル化精度の関係

本実験では、適切なサンプリング間隔 rsample の値について考察する. 橋脚を用いたスケル トンのサンプリングは第4章で記した手法で生成した橋脚のポリゴンモデルを利用してサ ンプリングを行う. 橋脚の本数は、120m のレールは6本、1km のレールは44本であった. ケーススタディのモノレールの橋脚の間隔は約20m であったため、サンプリング間隔 rsample には2.5m、5.0m、10.0m を設定し、サンプリングを行わない場合も検証した. rsample の値が 大きい場合は、少ない面数でレールのスイープ構造を近似したポリゴンモデルが生成可能 になる. 一方、各ユニット内の曲線構造を反映していないため、ユニットが曲線構造であっ た場合に誤差が大きくなる. サンプリングの間隔を細かくすれば、曲線構造に対応できる一 方、レール部の点群が持つノイズや欠損に敏感になる(図-5.12 (d)). また、直線構造に 対してサンプリング間隔を細かく設定すると、面数が増加するため、適応的なサンプリング 手法が必要になると考えられる.

5.4.3 既存のポリゴンモデル化手法との比較

既存手法(Poisson Surface Reconstruction, Alpha shape, 凸包)を用いたポリゴンモデル化 を行い,生成されたポリゴンモデルと計測点群との誤差と面数,計算時間の比較を行う.

図-5.14に示すように、Poisson Surface Reconstruction や Alpha shape では、欠損が大き い場合、そのまま反映されている.また、凸包では欠損を補っているものの、曲線構造が損 なわれている.一方、提案手法(図-5.12、図-5.13)は、欠損の部分にも適切に面が生 成されただけではなく、レールの曲線構造も反映したポリゴンモデル化を実現できたこと が確認できた.

精度は短いレールに対しては既存手法より誤差が大きい結果になったが、長いレールに 対しては既存手法より誤差が小さい結果になった.

計算時間に関しては、本提案手法は既存手法より長くなった.その主な理由として、提案 手法は中心軸の検出のための計算時間が多いことが考えられる.また,既存手法は入力点群 の点数が変わっても計算時間に大きな変化は見られなかったが、提案手法は計算時間が点 数に比例した.つまり、提案手法は入力点群の点数が多いとき、点数を間引くサンプリング 処理が効率化につながる.また、本手法は橋脚でサンプリングを行っているため、実際の構 造に即した変状やデータの管理などに利用できるクラスタリングが行えることも利点にな る.

5.4.4 維持管理への利用における評価

本提案手法で生成したポリゴンモデルやその面の構成は、維持管理に使うことに適して いるのか、足りない部材があるかについて考察する. 詳細度 200 の要件に関しては、提案手法は橋脚のポリゴンモデルと併用することで、直線 構造であれば余分な面を使わずに、曲線構造であればその構造を十分に表現できるために 面を分割させて、なおかつ本来のレールのスパンに則した面で構成されたポリゴンモデル を生成することを実現した.詳細度を更に向上させるためには、図-5.7 に示すように、モ ノレールのレール構造内には送電線や足場などの細かい付帯物もポリゴンモデル化するこ とが求められる.これらを点群として計測することは容易でない.しかし、本検証実験の断 面 C の例のように、入力する断面に付帯物の情報を付与することで、これらもスイープを 用いてポリゴンモデル化が可能である.一方レールのみのポリゴンモデルが必要な場合で は、断面 A、B のようにレールの断面のみを用意することで実装できる.以上より、入力す る断面の詳細度を変更することで、全体のポリゴンの詳細度を容易に変化することができ るため、提案手法はレール構造の維持管理に対応可能であると考えられる.

5.4.5 制限事項

提案手法には大きく分けて2点の制限事項がある.第1点は,事前にレールの部分をセ グメンテーションする必要がある点である.セグメンテーション結果にノイズがどの程度 含まれているかによって,生成されたポリゴンの品質が左右されるため,モノレール全体の 点群からレール部分を自動で高品質に抽出する必要がある.例えば,橋脚などレール付近の 対象物があらかじめ与えられている場合は,それを手がかりにセグメンテーションするこ とが考えられる.もう1つの制限事項は,同じ断面のスイープ構造のポリゴンモデルしか生 成できない点である.ケーススタディのモノレールの足場の部分は1本の骨組みに沿った 構造をしているが,厳密にははしごのような構造をしているため,1つの断面を押し出して 形成される構造ではない.しかしはしごは通常,中心の軸に対して直交する踏み桟の間隔が 一定である.そのため,踏み桟の間隔とはしごの厚みが分かれば,2つの断面をその間隔ご とに切り替えることでポリゴンモデル化できる.最後の制限事項は橋脚のテンプレートが 用意されていない場合は等間隔にスケルトンをサンプリングするため,生成されたポリゴ ンの面の境界が実際のレールの境界と一致していない可能性が発生する点である.

5.5 結論

本章では、レールのスイープ構造に着目し、断面とそれを押し出す軌道を用意することで、 規則的な面で形成されたポリゴンモデルを生成する手法を提案した.軌道は、構造物の対蹠 点をもとに計算し、規格化された断面のデータを入力してスケルトンに沿ってスイープさ せる.これにより、モノレールのレール構造の点群データから規則的な面で形成されたポリ ゴンモデル生成ができるようになった.検証実験を通じて、多くの欠損が含まれたレールの 点群であっても、規則的な面で形成されたポリゴンモデルを生成できたことを確認した.ま た、断面の詳細度を変更することで、送電線や足場などの付帯物も容易にポリゴンモデル化 することができる.

今後の展望として、精度向上のための点群のノイズや欠損に対しての頑健性の向上があ げられる.特に、現在の実装は、点群に含まれる他の箇所が、軸抽出などにおいての悪影響 を完全に除去できないことから、ノイズに対する頑健性の向上は必須である.また、梯子の ように線方向に繰り返し構造を持ちつつ、単純なスイープ状ではできない形状を同じ枠組 みで処理できるよう手法を拡張することも検討している.本提案手法を土木構造物の維持 管理に活用させるための課題については、前述した精度を向上する点に加えて、生成された ポリゴンモデルの面の境界を実際のレールの境界と一致させることが挙げられる.
第6章 鉛直断面のロフトを用いたポリゴンモデル化手法

前章では、レールのような断面が規格化され、かつ曲面を有する押し出し構造に対して有 効なポリゴンモデル化手法を開発した.本章では断面が規格化されていない曲面を有する 構造に対して有効なポリゴンモデル化手法を提案する.3次元 CAD で生成したような面で 構成されたポリゴンモデルを生成するには、複数の断面をつなぎあわせたポリゴンモデル 化が有効であると考える.土木構造物は地面に対して垂直に位置する例が多いため、水平面 の断面を連結させる例と鉛直面の断面を連結する例が考えられる.水平面の断面を求める ことは自明の問題であるため、本研究では鉛直面の断面を連結させる問題に注目する.鉛直 の断面は対象の構造物の中心軸に対して鉛直の断面を使用する.本研究では対象の土木構 造物をトンネルに指定する.トンネルは入り口から約 10m 間隔の覆エスパンがあり、その 覆エスパンごとにグループ分けしてクラックなどの情報を記録する.そのため、トンネルの 点群からライトなどの付帯物や路面を分離する手法も追加で開発した.

また,複数の形状の断面を最低限利用して直線構造や曲線構造を適切にポリゴンモデル 化させるために,Michikawaらが提案した簡略化手法⁸⁷⁾を参考に,ポリゴンモデル化に使用 する断面を選択する.

図-6.1に提案手法の流れを示す. 次節より, これらの詳細を述べる.



図-6.1 提案手法の概要

6.1 中心軸検出

まずポリゴンモデル化に使用する断面を検出するために使用する中心軸を入力点群から 検出する.提案手法では局所的対称性を利用して中心軸を計算する.欠損やノイズへの頑健 性を向上させるために,入力点群は2次元に変換し,画像準拠の局所的対称軸を計算する. まず,点群が曲線構造を有する場合が想定されるので,Ramerの手法⁸⁸⁾に基づき主成分分 析を用いて直線構造になるよう局所的にセグメンテーションを繰り返し行う(図-6.2 (a)). 次にそれぞれのセグメントの点群に対して凸包を使用して2次元点群の輪郭を求め,その 輪郭の対象性を利用して中心軸の候補点を求める(図-6.2 (b)).その後5.1節と同様の手 法で中心軸を平滑化,簡略化を行う(図-6.2 (c)).以下,各工程の詳細を述べる.



入力点群を直線構造になるよう局所的にセグメンテーションする手法は、まず入力点群の重心を求め、入力点群の第一次主成分ベクトルに対して垂直な直線で分割する. 同様の処理を、各分割された領域が凸になるまで繰り返す(図-6.3 (a)). この繰り返し回数 N はユーザが指定する. 分割された領域の点群ごとに凸包を使用し、その凸包のエッジとの最短距離が *d_{sil}*以下の点を輪郭として抽出する(図-6.3 (b)).



抽出した輪郭の点群から中心軸を検出するために, Hough 変換⁸⁹⁾を用いて全点対の線分 と *x* 軸のなす角 *φ* と長さ *d* のヒストグラムを求め, 頻値が高い点対の中点を中心軸の候補 点 **C** にする (**図**-6.4).



5.1 節と同様の手法で中心軸を平滑化, 簡略化を行うと, 密度が低い点を除去する処理や ラプラシアン平滑化によって, 中心軸の始点と終点が実際のトンネルの出入り口に到達し ていない可能性がある.そのため,最後に中心軸の始点と終点を補正する.図-6.5に概要 を示す.まず,中心軸の始点と終点を中心に半径 r_{co}の円を定義する.その円内における中 心軸の点のうち最も中心軸の始点と終点から離れた点を p_{co}とする.円内における2次元の 点群の点のうち,最も中心軸の始点と終点から離れておりかつ p_{co}と中心軸の始点と終点が 作るベクトル n_{co}とのなす角がほぼ 180°の点を新たな中心軸の始点と終点に置き換える.



図-6.5 中心軸の始点と終点の補正

6.2 断面検出

入力点群の中心軸を求めたならば、次はそれを使用して、入力点群から断面 SC_iを検出する. 断面は中心軸に対して鉛直な面に、その面の近くにある点を投影することで検出する. その鉛直な面 o_iは中心軸の頂点 c_i上に定義し、面からの距離が閾値 d_{sc}より短い点を投影する (図-6.6 (a), (b)). 断面検出の結果を図-6.6 (c)に示す. 次にそれぞれの断面 SC_iで、ローカル座標系 (X', Y', Z') を定義する (図-6.6 (d)). (X', Y', Z') では SC_iの中心を原 点に、Z 軸を Y'軸に、SC_iの法線ベクトルをZ'軸に定義する.



 \mathbf{SC}_{i}

- (a) 断面検出の方法(サイドビュー)
- (b) 断面検出の方法(トップビュー)



(c) 断面検出の結果(赤:スケルトン,緑:断面)



図-6.6 スケルトンを用いた断面検出

投影した断面は点群であるため、そのままではポリゴンモデル生成に使用できない.その ため、ポリラインHに近似する.ポリライン近似の流れを図-6.7に示す.まず凸包で大ま かなポリラインを作り、その後 Ramer-Douglas-Peucker アルゴリズム⁹⁰で凹構造も適用させ る.以下、Ramer-Douglas-Peucker アルゴリズムの手順を述べる.まず、点群を最近傍の凸包 で生成したエッジでクラスタリングする.次に、点群内の各点について、対応したエッジと の距離が *d*_h 以上であれば、その点をポリラインの頂点 *H*_{i+1} として新たに追加する処理を、 点群内の全点の対応したエッジとの距離が *d*_h 以下になるまで繰り返す.



図-6.7 断面のポリライン近似の流れ

トンネルは覆エコンクリート,路面,付帯物に大まかに分けられる.断面の点群に付帯物 が含まれている場合はそれを除去し,なおかつ路面の部分を分離することが望ましい.まず, 付帯物はライトとガードレールと仮定する.ライトはトンネルの上部に位置すると仮定し, 断面の凸包からの距離が *d*_h以上でありかつ Y'座標が 0 以上である点はライトとみなし除去 する(図-6.8 (a)).次にガードレールは細い形状であり覆エコンクリートや地面と接触し ていないと仮定し,断面の凸包からの距離が *d*_h以上でありかつ周りの点の分散が小さい点 はガードレールとみなし除去する(図-6.8 (a)).路面は X'軸に対して平行であり,路面の 近くの覆エコンクリートは路面に対して垂直になると仮定して,ポリラインを覆エコンク リートと路面に分離する(図-6.8 (b)).付帯物が含まれていないポリゴンモデルを生成で きるため,付帯物が含まれている点群から生成されたポリゴンまでの最短距離が閾値以下 である点を付帯物としてみなしセグメンテーションすることも可能である(図-6.8 (c)).



6.3 ロフトによるポリゴンモデル化

最後に,検出した断面を連結してポリゴンモデル化する.前工程では等間隔に断面の検出 を行った(図-6.9 (a))が,直線構造に不必要に面が生成されたり,逆に曲線構造が正確に 表現できなかったりする可能性がある.そのため,Michikawaらの手法⁸⁷⁾に基づき,ポリゴ ンモデル化に使用する断面を選択する(図-6.9 (b)).隣接する断面の形状特徴が類似して いる,かつ断面の法線のなす角が閾値未満の場合,その断面はポリゴンモデル化に使用しな い.



また,形状特徴が類似している断面は,ポリラインの頂点数を同一にして規則的なメッシュを生成するために,1つの断面を代表として選出しポリライン近似を行い,生成されたポリラインを類似した他の断面に置換する.まず断面の重心を用いた平行移動で粗目に位置合わせをし(図-6.10 (a)),次にΖ軸を中心にした回転で精緻に位置合わせを行う(図-6.10 (b)).回転角θはそれぞれの断面の法線のなす角によって求める.



(a) 平行移動を用いた粗めの位置合わせ
 (b) 回転を用いた精緻な位置合わせ
 図-6.10 代表断面ポリラインの類似した断面へ置き換える処理の概要

残った断面のポリラインを、ロフトを用いてポリゴンモデル化する.まず、SC_iとSC_j内の各点の組み合わせによってできる線分の長さが最も距離が短い組み合わせ (sc_{i0}, sc_{j0})を 探索する.次に、以下に示す繰り返し処理に対して、sc_iに sc_{i0}を, sc_jに sc_{j0}をあてはめる.

- (sc_i, sc_{j+1}) と (sc_{i+1}, sc_j) によってできる線分の長さを計算する. 次の処理はその結果に よって2通りに分岐する(図-6.11 (a)).
 - a. もし線分 (sc_i, sc_{j+1})の方が短い時は、3 点(sc_i, sc_j, sc_{j+1})を用いて三角メッシュを生成する.次に sc_iは sc_iのままで、sc_jは sc_{j+1}に置き換えて、1の処理を行う(図-6.11 (b)).
 - b. もし線分 (sc_{i+1}, sc_j)の方が短い時は、3 点(sc_i, sc_j, sc_{i+1})を用いて三角メッシュを生成する.次に sc_jは sc_jのままで、sc_iは sc_{i+1}に置き換えて、1の処理を行う(図-6.11 (c)).

以上の繰り返し処理を sc_{i+1} が sc_{i0} に, sc_{i+1} が sc_{i0} になるまで繰り返す(図-6.11 (d)).



6.4 検証実験

3 種類のトンネルを使用して,検証実験を行う.1 つは直線構造(図-6.12 (a), (e), 1,046,899 点)で,もう1つは曲線構造(図-6.12 (b), (f), 1,163,924 点),最後の1つは曲線構造に加えて緊急停車位置が含まれている(図-6.12 (c), (d), (g), 2,513,777 点). それ ぞれ,入り口付近の樹木などの点群を手動で除去した.

トンネルの外壁は約9m間隔の覆工スパンにより領域分けされ,かつ内部にはライト,中 央分離帯のポール,ジェットファン,加えて直線構造のトンネルには歩道が,曲線構造のト ンネルは鉄道用であるので線路が,緊急停車位置があるトンネルはガードレールがある.

(**図-6.13**)

これら3つのトンネルの点群を,提案手法を用いてポリゴンモデル化する.設定した各パ ラメータを表-6.1表に示す. *r*sample はいずれも0.2mに設定した.中心軸取得の結果が図-6. 14であり,ポリゴンモデル化の結果が図-6.15である.また,比較のために Poisson surface reconstruction でポリゴンモデル化した結果を図-6.16に,さらにそれを提案手法でポリゴ ンモデル化したメッシュとほぼ同じの面数に QEM⁸²⁾を用いて簡略化した結果を図-6.17 に示す.最後にそれぞれの結果のまとめを表-6.2に示す.



	Ν	d _{sil} (m)	r _{cen} (m)	d _{cen} (m)	r _{lap} (m)	r _{PCA} (m)	<i>r_{co}</i> (m)	<i>d_{sc}</i> (m)	s _{max}	<i>d</i> _{<i>h</i>} (m)	<i>r_{hr}</i> (m)	<i>d</i> _{<i>hr</i>} (m)
直線構造	5	0.2	7	3	0.5	0.5	5	0.2	0.9	0.2	0.5	0.1
曲線構造	5	0.2	7	3	0.05	0.1	5	0.2	0.97	2	0.5	0.1
緊急停車 位置あり	7	0.5	7	3	7.0	1.0	5	0.5	0.8	0.2	0.2	0.07

表-6.1 各検証実験に用いたパラメータ

(a) 直線構造



(b) 曲線構造



(c) 緊急停車位置あり 図-6.14 中心軸検出結果





図-6.17 Poisson surface reconstrction でポリゴンモデル化した結果を QEM で簡略化した 結果

		計算時間 [s]	頂点 (路面, 覆エコンク リート)	面 (路面,覆エコンク リート)	平均誤 差 [m]
	直線構造	7.868	168 (16, 154)	168 (16, 154)	0.036
坦安千江	曲線構造	10.979	4,864 (376, 4,616)	9,558 (612, 8,946)	0.075
旋 杀于 运	緊急停車 位置あり	114.942	12,988 (1,050, 12,238)	25,804 (1,788, 24,016)	0.131
	直線構造	48.475	1,394,639	2,789,306	0.003
Poisson surface	曲線構造	52.972	1,367,708	2,734,916	0.014
reconstruction	緊急停車 位置あり	45.149	785,282	1,570,524	0.011
Deisean surface	直線構造	N/A	82	160	0.030
Poisson surface	曲線構造	N/A	4,906	9,600	0.039
keconstruction を簡略化	緊急停車 位置あり	N/A	12,997	26,000	0.017

表-6.2 各検証結果のまとめ

6.5 考察

本節では、6.4節検証実験で得られた結果をもとに、ポリゴンモデル化品質、ポリゴンモ デル化精度、欠損やノイズへの頑健性、計算時間、維持管理の利用における評価、制限事項 について考察する.

6.5.1 既存のポリゴンモデル化手法との比較

図-6.15に示すように、提案手法は形状を保持した上に少ない面数でポリゴンモデル化 が行えている. Poisson surface reconstruction を用いた手法であっても形状は保持されている が、三角メッシュ数が膨大である.実際に、提案手法で生成したポリゴンモデルの面数は Poisson surface reconstruction で生成したポリゴンモデルの面数の約 0.1 倍である.膨大な面 数のポリゴンモデルを簡略化することは可能であるが、図-6.17に示すように形状が保持 されない可能性がある.ポリゴンモデル化の精度については、点群との平均誤差は既存手法 より大きく出ているものの、生成されたポリゴンモデルとの誤差が大きい点群の多くは付 帯物に属している.実際、Poisson surface reconstruction で生成したポリゴンモデルには付帯 物が含まれている領域が存在する.つまりは、提案手法はトンネルの覆工のみが適切にポリ ゴンモデル化されていると言える.

6.5.2 形状や構造の違いによる精度や品質の比較

3 種類の形状が異なるトンネルの間での精度について注目すると、直線構造や曲線構造で あっても同等の高い精度でポリゴンモデル化できたことが分かる.緊急停車位置のような 断面の形状が異なる構造が存在する場合は、異なる断面に変化する部分のポリゴンモデル が正確に行えない場合もある.これを解決するにはサンプリングの間隔を小さくすること が考えられる.

ポリゴンモデル化の精度は断面の点群の密度に依存する. 直線構造のトンネルをランダ ムに全体の 20%の点にサンプリングしたものを同じパラメータで実装した結果,片方の歩 道がポリゴンモデル化されなかった. このように,トンネルの歩道といった複雑な形状をポ リゴンモデル化させるためには,密度の高い点群が必要になる.

6.5.3 維持管理への利用における評価

本研究ではトンネルに焦点を当てて、本提案手法で生成したポリゴンモデルやその面の 構成は、維持管理に使うことに適しているのか、足りない、もしくは余分に分割している領 域があるのかについて考察する.本提案手法では詳細度 200 に対応させることは可能であ ったが、4章と5章で示した手法のように、入力前に手動で作成するテンプレートポリゴン モデルや断面の詳細度を変更することで全体の詳細度を調整させることが不可能である. しかし,提案手法はトンネルの点群を覆エコンクリート,路面,付帯物に分離することを可 能にしているため,分離した付帯物の点群を3次元 CAD で生成した3次元モデルと置換す ることで,より詳細な構造もポリゴンモデル化できると期待する.トンネルの覆エコンクリ ートのスパンに則した面の分割については,提案手法では十分に実行されていない.これを 解決するために考えられることは,図-6.18に示すように,中心軸をサンプリングする間 隔を覆エスパンの長さ9~10mの約数になるよう設定し,ポリゴンモデル化に使用する断面 を選定する工程の前に覆エスパンごとにクラスタリングを行い,各クラスタでポリゴンモ デル化に使用する断面を選定することである.



6.5.4 制限事項

提案手法には大きく2点の制限事項が残されている.1点目は、トンネルの周りの街 路樹など、外部の土木構造物でない点群を事前に除去する必要がある点である.対象の オブジェクトの外側に余分な点が存在すると、輪郭抽出やポリライン近似を行うときに その点を輪郭やポリラインに含む可能性がある.2点目は、中心軸を取得するために入 力点群を2次元に変換したため、高架道路のように、上空から見た時に交わりがある構 造には対応できない点である.**第5章**で示したように3次元の点群を用いてスケルトン を取得することは品質と精度が劣るが可能であるので、必要に応じて中心軸を求める手 法を使い分けることが重要であると考える.

6.6 結論

本章では、点群の中心軸を求め、それに対して鉛直な断面を連結させることで、曲線構造 を持つ土木構造物の点群をポリゴンモデル化させる手法を開発した.本研究では対象の土 木構造物をトンネルに設定し、トンネルの維持管理を行うにおいて必要な、覆工コンクリー トと路面、付帯物に分離を行う手法も開発した.3種類の形状が異なるトンネルの点群で検 証実験を行い,提案手法は最低限な面数で,点群の形状が保持され,かつ覆エコンクリート と路面,付帯物が分離されたポリゴンモデルを生成することを確認した.

提案手法は検出される断面をポリライン化した結果によって,生成されるポリゴンモデルの精度や品質が異なる特徴を持つ.つまり,入力点群の密度や設定したパラメータを調整することで,維持管理の用途に合わせた複数の詳細度のポリゴンが生成可能である.

今後の課題は 3 次元の点群で求めたスケルトンとの併用で対応可能な土木構造物を拡張 する点や,対象のオブジェクトの外側にあるノイズ点群を自動除去することが挙げられる.

第7章 結論

7.1 本研究のまとめ

本研究では、土木構造物計測点群から自動で維持管理に使用するための CIM モデルを生 成する事を目的に設定し、既往研究調査から得られた課題点や未着手点を解決する 3 通り のポリゴンモデル化手法を開発した.1つ目は、土木構造物内に類似した構造が多数ある性 質を利用して,3次元検索技術と位置合わせを用いて,類似した連続的な構造を効率的にポ リゴンモデル化する手法である.この手法は既存手法が有する,平面や円柱といったプリミ ティブでない構造を認識,検出する点や同一工程の省略,計測できなかった領域の補完,橋 脚の高さなどのわずかな違いの補正を可能にした.2つ目は、オブジェクトの中心を通る軸 (スケルトン)を検出し、それに沿って規格された断面を押し出すことでポリゴンモデルを 生成する手法である.3つ目は、中心軸に対して鉛直な複数の断面を連結させることでポリ ゴンモデルを生成する手法である.2つ目と3つ目の手法は、曲線構造が含まれた土木構造 物の点群を最低限な面数でかつ実際の構造に適した面で構成されたポリゴンモデルの生成, 計測できなかった領域の補完,断面やパラメータ変更による容易な詳細度の変更を可能に した.いずれの手法も実在する複数の土木構造物の計測点群を用いて検証実験を行った結 果, CIM ガイドラインが定めた詳細度の基準を満たすことは達成できたが, 既存の点群か らポリゴンモデルを自動生成する手法と比較すると精度が多少劣るポリゴンモデル化が生 成された.

本研究は点群から自動でポリゴンモデルを生成することを目標にしているが,一部手動 操作を必要としている.その例は前処理として不要な点やメッシュを除去する,テンプレー トポリゴンモデルの自動スケーリングのために,1つだけ対象の部材をセグメンテーション する,パラメータ入力や定義,テンプレートポリゴンモデルの作成,断面や他の部材のポリ ゴンモデルの作成がある.また高品質のテンプレートポリゴンモデルや断面を用いること により欠損への頑健性を向上させたが,その前の工程に当たる類似領域検出,スケルトン検 出,中心軸検出の精度に欠損が依存する結果になった.

生成されたポリゴンを維持管理の面から評価すると、点の密度やパラメータの調整、入力 するテンプレートポリゴンモデルや断面の詳細度の指定により、詳細度を高くも低くも設 定することが可能であり、さまざまな維持管理の用途に活用できることが大きな利点であ ると言える.そのために必要な条件として、多少の欠損が含まれていても、土木構造物全体 を取得した点群が必要であり、また各コンポーネントのポリゴンモデルの属性やテンプレ ートポリゴンモデルや断面の詳細な構造を手動で追加する必要がある.

7.2 今後の展望

提案手法では点群から幾何学的なポリゴンモデルを生成したが,属性情報が付与された CIM モデル化はされていない.現在,既存手法はCIM モデルの定義,属性情報などのデー タ入力は手動で設定しているが,類似性を利用してセグメンテーションした同義の類似部 材のデータ入力を並列化して行える可能性がある.また,セグメンテーションで使用した構 成要素や形状の特徴を利用して,点群から自動的に IFC と結びついたプロダクトモデルま で生成できる見込みがある.

また、本提案手法は計測される点群の品質に依存する.レーザスキャナや写真測量では対 象の表面しか計測できないため、支承などの隠れた部材が取得されない.またレーザスキャ ナの性能や点密度によっては、柵などの細かい部材が十分に取得されない場合がある.長大 な土木構造物に対して、密度や詳細度の高い点群を全範囲計測し、一つひとつモデリングす ることは非常にコストがかかる.これらの問題を解決する手法として、図面や詳細まで計測 可能な UAV を用いたり、図面や写真を併用したりすることで、局所的な詳細度の高いポリ ゴンモデルを生成し、その結果を残りの類似の領域にも反映させる手法が有効でないかと 考える.その際、類似部材上で付帯物の有無や位置の違いなどという細かい差分が生じる可 能性がある.これらを判定し、更に修正することができれば更に効率化に貢献できる.

更に,土木構造物のみに限らず,建築物や路上構造物,更にその変状に対しても,点群からの3次元プロダクトモデル化が実現できると考える.その際,点群だけでは不十分な例も 多数あると予想するため,写真やセンサの併用が必要と推察する.

参考文献

- 1) 三上市蔵,田中成典,石井由美子,奥裕子. "鋼道路橋維持管理業務支援のための三次元 モデルライブラリシステムの開発", *土木情報システム論文集*, Vol. 10, pp. 129-136, 2001.
- 清水智弘,吉川眞,瀧浪秀元,御崎哲一,高橋康将,中山忠雅,内田修,近藤健一."3 次 元モデルを用いた橋梁維持管理システムの開発", 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 69, No. 2, pp. 45-53, 2013.
- 3) 田原孝. "3次元モデルを活用したネットワークカメラでの建設構造物の可視化手法に 関する研究", 土木学会論文集F3 (土木情報学), Vol. 69, No. 2, pp. 121-129, 2013
- Yabuki N. "Issues and Implementation Methods for BIM in the Civil Infrastructure Domain", Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Urbanization (ICSU) 2010, Hong Kong, China, Memory, pp. 1-5, 2010.
- 5) Yabuki N. "BIM and Construction Information Modeling (CIM) in Japan", In *Proceedings of the International Conference on Computational Design in Engineering (CODE 2012)*, pp. 325, 2012.
- buildingSMART, "Industry Foundation Classes, IFC4 Official Release." Available from: [Accessed: 19-August-2016]">http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/final/html/>[Accessed: 19-August-2016].
- 7) 国土交通省 CIM 導入推進委員会, "CIM 導入ガイドライン(案) 第 1 編 共通編",
 Available from: http://www.mlit.go.jp/tec/it/pdf/guide01.pdf> [Accessed: 15-November-2017]
- 8) 国土交通省 CIM 導入推進委員会, "CIM 導入ガイドライン(案)第5編 橋梁編",2017, Available from: http://www.mlit.go.jp/tec/it/pdf/guide01.pdf> [Accessed: 24-December-2017]
- 9) 国土交通省 CIM 導入推進委員会, "CIM 導入ガイドライン (案) 第6編 トンネル編", 2017, Available from: http://www.mlit.go.jp/tec/it/pdf/guide01.pdf> [Accessed: 24- December -2017]
- 10) Yabuki N., Lebegue E., Gual J., Shitani T., and Li Z. "International Collaboration for Developing the Bridge Product Model IFC-Bridge", In *Proceedings of Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, pp. 1927-1936, 2006.
- Yabuki, N., Takashi A., and Tomohiro F. "Development and Application of a Product Model for Shield Tunnels." In *Proceedings of the 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2013)*, 435-447. Montreal, Canada, 2013.
- 12) Chen W., Yabuki N., Fukuda T., Michikawa T., and Motamedi A. "Development of Product Model for Harbor Structures Degradation", In *Proceedings of International Conference on Civil* and Building Engineering Informatics (ICCBEI 2015), No. 81, Tokyo, Japan, 2015.
- 13) 板倉崇理, 矢吹信喜, 福田知弘, 道川隆士. "維持管理のための橋梁 3 次元プロダクトモデルの最適詳細度に関する基礎的検討", 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 70, No. 2, pp. I_42-I_49, 2014.

- 14) The American Institute of Architects (AIA). "AIA Contract Document G202[™]-2013", Project Building Information Modeling Protocol Form, 2013. Available from: < http://www.aia.org/aiaucmp/groups/aia/documents/pdf/aiab099086.pdf > [Accessed: 23-September-2016]
- 15) 有賀貴志, 矢吹信喜. "変状データを含む開削トンネルのプロダクトモデルの構築", *土* 木学会論文集F3 (土木情報学), Vol. 68, No. 1, pp. I 58-I 70, 2012.
- 16) 有賀貴志, 矢吹信喜. "土木構造物を対象とした変状の情報管理のためのプロセスモデルの開発", 土木学会論文集F3 (土木情報学), Vol. 69, No. 1, pp. I_10-I_20, 2013.
- 17) 有賀貴志, 矢吹信喜. "コンクリート構造物の変状管理におけるプロダクトモデルの適用", *土木学会論文集F3 (土木情報学)*, Vol. 69, No. 2, pp. I_71-I_81, 2013.
- 18) 国土交通省 国土地理院, "航空レーザ測量について", Available from: http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_index.html [Accessed: 09-Febrary-2017].
- 19) 国土交通省 国土地理院, "UAV を用いた公共測量マニュアル(案)", 2016, Available from: http://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uav/#01 [Accessed: 09-Febrary-2017].
- 20) Agarwal S., Furukawa Y., Snavely N., Simon I., Curless B., Seitz S. M., and Szeliski R. "Building Rome in a Day", *Communications of the ACM*, Vol. 54, No. 10, pp. 105-112, 2011.
- 21) Dai F., Rashidi A., Brilakis I., and Vela P. "Comparison of Image-Based and Time-of-Flight-Based Technologies for Three-Dimensional Reconstruction of Infrastructure", *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 139, No. 1 (January 1, 2013), pp. 69-79, 2013.
- 22)藤井幸泰,正垣孝晴,宮川真国,渡邉邦夫."写真測量による旧横須賀製鉄所第1号ドラ イドックの記録と石材表面侵食量の測定."地盤工学ジャーナル, Vol. 10, No. 4, pp. 595-602. 2015.
- 23) 大石哲, 白谷栄作, 桐博英, 高橋順二, 水上幸治, 村木広和. "UAV を使った低空画像解 析による海岸堤防の劣化状態の検出", 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_1717-I_1722, 2015.
- 24) 中川 雅史, 倉持 里史, 黒木 雅人, "LiDAR VR による高速な点群データ補間法", 写真 測量とリモートセンシング, Vol. 50, No. 4, pp. 243-251, 2011.
- 25) Rusu R. B. and Cousins S. "3D Is Here: Point Cloud Library (PCL), In 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 1-4, 2011.
- 26) Cignoni P., Callieri M., Corsini M., Dellepiane M., Ganovelli F., Ranzuglia G., "MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool", *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference*, pp. 129-136, 2008. Available from: http://www.meshlab.net/ [Accessed 13 Nov. 2017].
- Girardeau-Montaut D. "CloudCompare 3D point cloud and mesh processing software Open Source Project", 2009, Available from: http://www.danielgm.net/cc/ [Accessed 17 Nov. 2017].
- 28) Rashidi A. and Brilakis I., "Point Cloud Data Cleaning and Refining for Built Infrastructure

Modeling Applications", Proc. of the 2016 Construction Research Congress (CRC 2016), pp. 919-929, 2016.

- Fu K. S. and Mui J. K. "A Survey on Image Segmentation", *Pattern Recognition*, Vol. 13, No. 1, pp. 3-16, 1981.
- Zhang Y. J. "A Survey on Evaluation Methods for Image Segmentation", *Pattern Recognition*, Vol. 29, No. 8, pp. 1335-1346, 1996.
- Shamir A. "A Survey on Mesh Segmentation Techniques", *Computer Graphics Forum*, Vol. 27, No. 6, pp. 1539-1556, 2008.
- 32) Nguyen A. and Le B. "3D Point Cloud Segmentation: A survey, In 2013 6th IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), pp. 225-230, 2013.
- Ballard D. H. and Brown C. M. "Region Growing", In *Computer Vision*, Prentice Hall, pp. 149-165, 1982.
- 34) Vincent L. and Soille. P. "Watersheds in Digital Spaces: An Efficient Algorithm based on Immersion Simulations", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 6, pp. 583-598, 1991.
- 35) Kass M., Witkin A., and Terzopoulos D. "Snakes: Active Contour Models", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1, No. 4, pp. 321-331, 1988.
- 36) Sethian J. A. "Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Geometry", *Fluid Mechanics, Computer Vision, and Materials Science*, England: Cambridge University Press, 1999.
- 37) Boykov Y. and Kolmogorov V. "Computing Geodesics and Minimal Surfaces via Graph Cuts", In *Computer Vision, 2003. Proceedings Ninth IEEE International Conference*, pp. 26-33, 2003.
- 38) Fischler M. A., and Robert C. B. "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography", *Communications of the* ACM, Vol. 24, No. 6, pp. 381-395, 1981.
- 39) 大渕竜太郎. "3次元形状の検索", 映像情報メディア学会誌,7月号, pp. 93-98, 2010.
- 40) Osada R., Funkhouser T., Chazelle B., and Dobkin D. "Shape Distributions", *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 807-832, 2002.
- 41) Ohbuchi R., Minamitani T. and Takei T. "Shape Similarity Search of 3D Models by using Enhanced Shape Functions", *International Journal of Computer Applications in Technology* (*IJCAT*), Vol. 23, No. 3/4/5, pp. 70-85, 2005.
- Mori G., Belongie S., and Malik J. "Efficient Shape Matching using Shape Contexts", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 27, No. 11, pp. 1832-1837, 2005.

- 43) Lowe D. G. "Object Recognition from Local Scale-invariant Features", *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, pp. 1150-1157, 1999.
- 44) Bay H., Tuytelaars T., and Van G. L. "Surf: Speeded Up Robust Features", *In Computer vision–* ECCV 2006, Springer Berlin Heidelberg, pp. 404-417, 2006.
- 45) Nan L., Xie K. and Sharf A. "A Search-classify Approach for Cluttered Indoor Scene Understanding", ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 31, Issue 6, pp. 137:0-137:10, 2012.
- 46) Guy E., Thiery J. M., and Boubekeur T. "SimSelect: Similarity-based Selection for 3D Surfaces", *Computer Graphics Forum*, Vol. 33, No. 2, pp. 165-173, 2014.
- 47) Attene M., Marini S., Spagnuolo M., and Falcidieno B. "The Fast Reject Schema for Part-in-Whole 3D Shape Matching", In M. Dao oudi and T. Schreck (Eds.), Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval, The Eurographics Association, 2010.
- 48) Besl P. J. and McKay H. D. "A Method for Registration of 3D Shapes", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256, 1992.
- 49) Vapnik V. and Lerner. A. "Pattern recognition using generalized portrait method", Automation and Remote Control, Vol, 24, 1963.
- Tsochantaridis I., Joachims T., Hofmann T., Altun Y. "Large Margin Methods for Structured and Interdependent Output Variables", *The Journal of Machine Learning Research*, Vol. 6, No. 9, pp. 1453-1484, 2005.
- 51) Tagliasacchi A., Delame T., Spagnuolo M., Amenta, N. and Telea A. "3D Skeletons: A State-ofthe-Art Report", *Computer Graphics Forum*, Vol. 35, No. 235, pp. 573-597, 2016.
- 52) Blum H. "A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape", *In W. Wathen-Dunn, ed. Models for the Perception of Speech and Visual Form. Cambridge: MIT Press*, pp. 362-380, 1967.
- 53) Tagliasacchi A., Zhang H., and Cohen-Or D. "Curve Skeleton Extraction from Incomplete Point Cloud", In ACM SIGGRAPH 2009 Papers, SIGGRAPH '09. New York, NY, USA: ACM, pp. 71:1-71:9, 2009.
- 54) Vanna S., Kawata H., and Kanai T. "A Robust and Centered Curve Skeleton Extraction from 3D Point Cloud", *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 9, No. 6, pp. 869-879, 2012.
- 55) Mitra N. J., Guibas L. J., and Pauly M. "Partial and Approximate Symmetry Detection for 3D Geometry", In ACM SIGGRAPH 2006 Papers, SIGGRAPH '06. New York, NY, USA: ACM, pp. 560-568, 2006.
- 56) Pătrăucean V., Armeni I., Nahangi M., Yeung J., Brilakis I., and Haas C. (2015). State of Research in Automatic as-Built Modelling, Advanced Engineering Informatics, Infrastructure Computer Vision, Vol. 29, No. 2, 162-171.

- 57) Xiong X., Adan A., Akinci B., and Huber D. "Automatic Creation of Semantically Rich 3D Building Models from Laser Scanner Data", *Automation in Construction*, Vol. 31, pp. 325-337, 2013.
- 58) Wang C., Yong K. C., and Changwan K. "Automatic BIM Component Extraction from Point Clouds of Existing Buildings for Sustainability Applications", *Automation in Construction*, Vol. 56, pp. 1-13, 2015.
- 59) Armeni I., Sener O., Zamir A. R., Jiang H., Brilakis I., Fischer M., and Savarese S. "3D Semantic Parsing of Large-Scale Indoor Spaces", *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016.
- Ishikawa K., Tonomura F., Amano Y., and Hashizume T. "Recognition of Road Objects from 3D Mobile Mapping Data", *International Journal of CAD/CAM*, Vol. 13, No. 2, pp. 41-48, 2013.
- 61) Yu Y., Li, J. Guan, H., Zai D., and Wang C. "Automated Extraction of 3D Trees from Mobile LiDAR Point Clouds", *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5, pp. 629-632, 2014.
- 62) Manandhar D. and Shibazaki R. "Feature Extraction from Range Data", In *Proceedings of 22nd Asian Conference on Remote Sensing*, Vol. 2, pp. 1113-1118, 2001.
- 63) Michikawa T., Moriwaki K., Yabuki N., Fukuda T., Motamedi A., Hara K., and Kurimoto S. "Automatic Extraction of Roadside Trees from MMS data using Minimum Spanning Tree", In Proc. of 9th International Symposium on Mobile Mapp ing Technology (MMT2015), 2015.
- Fukano K., Masuda H. "Detection and Classification of Pole-like Objects from Mobile Mapping Data", *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-3/W5, 2015, ISPRS Geospatial Week 2015, 28 Sep 03 Oct 2015, La Grande Motte, France, pp. 57-64, 2015.
- 65) Walsh S. B., Borello D. J., Guldur B., and Hajjar J. F. "Data Processing of Point Clouds for Object Detection for Structural Engineering Applications", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 28, pp. 495-508, 2013.
- 66) 塚田 義典, 田中 成典, 窪田 諭, 中村 健二, 岡中 秀騎. "点群データを用いた橋梁の 3次元モデルの生成に関する研究", 知能と情報, Vol. 27, No. 5 pp. 796-812, 2015.
- 67) 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/ Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 80, No. 6, pp. 604-608, 2014.
- 68) Czerniawski T., Mohammad N., Carl H., and Scott W. "Pipe Spool Recognition in Cluttered Point Clouds Using a Curvature-Based Shape Descriptor", *Automation in Construction*, Vol. 71, Part 2 (November), pp. 346-358, 2016.

- 69) Berger M., Tagliasacchi A., Seversky L. M., Alliez P., Levine J. A., Sharf A., and Silva C. T. "State of the Art in Surface Reconstruction from Point Clouds", In S. Lefebvre and M. Spagnuolo (Eds.), Eurographics 2014 - State of the Art Reports, The Eurographics Association, 2014.
- 70) Hoppe H., DeRose T., Duchamp T., McDonald J., and Stuetzle W. "Surface Reconstruction from Unorganized Points", ACM, Vol. 26, No. 2, pp. 71-78, 1992.
- Carr J. C., Beatson R. K., Cherrie J. B., Mitchell T. J., Fright W. R., McCallum B. C., and Evans
 T. R. "Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions", *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM, pp. 67-76, 2001.
- 72) Ohtake Y., Belyaev A., Alexa M., Turk G., and Seidel H. P. "Multi-level Partition of Unity Implicits", ACM Transactions on Graphics, Vol. 22, No. 3, pp. 463-470, 2003.
- 73) Ohtake Y., Belyaev A., and Seidel H.P. "3D Scattered Data Interpolation and Approximation with Multilevel Compactly Supported RBFs", *Graphical Models*, Vol. 67, No. 3, pp. 150-165, 2005.
- 74) Kazhdan M., Bolitho M., and Hoppe H. "Poisson Surface Reconstruction", In Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing, pp. 61-70, 2006.
- 75) Kazhdan M. and Hoppe H. "Screened Poisson Surface Reconstruction", ACM Transactions on Graphics, Vol. 32, No. 3, pp. 29:1-29:13, 2013.
- 76) Edelsbrunner H. and Mücke E. P. "Three-dimensional Alpha Shapes", ACM Transactions on Graphics, Vol. 13, No. 1, 43-72, 1994.
- 77) Preparata F. P. and Hong S. J. "Convex Hulls of Finite Sets of Points in Two and Three Dimensions", *Communications of the ACMÄi0*, Vol. 20, No. 2, 87-93, 1977.
- 78) Masuda, H., Ichiro T., and Masakazu E. "Reliable Surface Extraction from Point-clouds Using Scanner-dependent Parameters", Computer-Aided Design and Applications, Vol. 10, No. 2, pp. 265-277, 2013.
- 79) 福田知弘,北川憲佑,矢吹信喜."非凸多角形を含む建築模型に対応した点群からの対話的な3次元モデリングシステムの開発",日本建築学会計画系論文集,Vol. 78, No.687, pp.1231-1239, 2013.
- 80) Gottschalk S., Lin M. C., and Manocha D. "OBBTree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection", In *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics* and Interactive Techniques, pp. 171-180, 1996.
- 81) Date H., Matsuyama Y., and Kanai S. "Registration of Point Clouds of Large Scale Environments using Point Projection Images", In *Proceedings of 15th International Conference on Precision Engineering*, D31, Kanazawa, Japan, 2014.

- 82) Garland M. and Heckbert P. S. "Surface Simplification Using Quadric Error Metrics", In Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 209-216, 1997.
- 83) Cook R. L. "Stochastic Sampling in Computer Graphics", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 5, No. 1, pp. 51-72, 1986.
- 84) Harris C. and Stephens M. "A Combined Corner and Edge Detector", In *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, pp. 147-151, 1988.
- Agisoft. "Agisoft PhotoScan", 2013. Available from: http://www.agisoft.com/ [Accessed: 30-May-2016].
- Trible. "SketchUP", Available from: http://www.sketchup.com/ja [Accessed: 09-Febrary-2017].
- 87) Michikawa T., Yabuki N., and Fukuda T. "Lofting-based Shape Simplification of Building Models using Voxelization", In *Proceedings of International Conference on Civil and Building Engineering Informatics (ICCBEI 2015)*, Tokyo, 2015.
- 88) Ramer U. "An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves", *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 1, No. 3, pp. 244-256, 1972.
- 89) Ballard D. H. "Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes", *Pattern Recognition*, Vol. 13, No. 2, pp. 111-22, 1981.
- 90) Douglas D. H. and Peucker T. K. "Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature", *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, Vol. 10, No. 2, pp. 112-122, 1973.

まず、本研究をまとめるにあたり、日頃から研究活動遂行に加え、論文執筆における綿密 なるご指導までを頂いた、主査の大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻矢吹 信喜教授, ならびに副査の澤木昌典教授, 福田知弘准教授に深く感謝申し上げます. 理化学 研究所に異動された現在も熱心に指導をいただいた道川隆士先生、カナダに帰国された現 在も英文の指導だけでなく研究計画や研究内容についてもご指導をいただいた Ali Motamedi 先生, Amin Hammad 先生, アルバイト業務を通じてさまざまな実務での知識をご 享受してくださり,多くのケーススタディを提供してくださった KUMONOS コーポレーシ ョン株式会社の皆さま、特に社長の中庭和秀様、亀井志郎様、小西里奈様、真鍋鎮男様、本 研究室の秘書である大川まり様,廣永喜美代様,竹田順子様,播磨美智子様,市川志奈様, 丹羽のぶ代様, 眞殿ゆり様, 工代澄様, 博士後期課程の仲間として共に研究してきた Alipour Yaser 氏, Natephra Worawan 氏, Peng Jian 氏, Chavanont Khosakitchalert 氏, 時に教えられる こともありながらともに切磋琢磨した後輩の井上和哉氏,西村直人氏,山口麗華氏,山崎諒 氏,朱閲晗氏,張旭輝氏,穴井智史氏,大西啓晃氏,湊洸介氏,山本敦大氏,曹睿氏,厳Liang 氏,上地創太氏,城戸大輝氏,阪本由佳子氏,田中翔氏,研究生の Kayla Manuel 氏,社会的 なことも教わった博士課程の八巻悟様,羽鳥文雄様,田原孝様,四月朔日勉様,福士直子様, 陳文軒様,影山輝彰様,山本耕平様,池田雄一様,現在は卒業しましたが5年間の研究生活 を支えてくださった先輩方の白勇氏,古林修平氏,芦田雄太氏,李世一氏,板倉崇理氏,立 川貴弘氏,種村貴士氏,中山一希氏,佐藤佑亮氏,平井利枝氏,細川雅弘氏,脇田卓氏,王 哲氏,丁亜奎氏,三宅宗俊氏,横井一樹氏,Mariana Chung 氏,韓玉倩氏,聶玉靖氏,桑室 泰享氏,全ての方にここに感謝申し上げます.

最後に、大学・大学院での8年間、突然の入院や進路変更もありましたが、学生生活を送 る上での精神的、経済的な環境を整えて下さり、なおかつ、いつも私の成長を温かく見守り、 応援してくれた父謙次郎、母晴美、妹実優、弟僚太には、深く感謝致します. 有難う御座い ました.