スケルトンと断面を利用したモノレールの レール部点群のポリゴンモデル化手法の開発

日高 菜緒¹・道川 隆士²・矢吹 信喜³・福田 知弘⁴・Ali MOTAMEDI⁵

¹学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 博士前期課程

E-mail: hidaka@it.see.eng.osaka-u.ac.jp

²非会員 理化学研究所研究員 光量子工学研究領域 光量子制御技術開発チーム

³フェロー会員 大阪大学教授 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: yabuki@see.eng.osaka-u.ac.jp

⁴正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻

⁵非会員 大阪大学 JSPS外国人特別研究員

本論文では、スイープ構造であるモノレールのレールの点群のポリゴン化手法を提案する。モノレールは長大でモデル化が容易でなく、特にレール部分は高所にあり満足に点群を計測することも難しい。そのため、既存の手法ではレールの維持管理に有効なポリゴン化は困難であった。本論文で提案する手法は、構造物がもつ対称性に着目して、点群の欠損に頑健なスケルトンを抽出する。スケルトンが得られれば、それに沿って断面を押し出すことでポリゴンが容易に生成できる。提案手法によって生成されたポリゴンは、規則的な構造を持っており、維持管理に活用しやすい。また、入力点群に欠損があったとしても、補完できるなどの利点がある。本論文では、レーザースキャナで計測したモノレールの点群に提案手法を適用することで有用性を検証した。

Key Words: point cloud, polygonization, skeleton, sweep, CIM

1. はじめに

モノレールは、都市間の交通手段の一つである。モノレールには、様々な形式が存在するが、一般的には、レールとそれを支える橋脚、駅舎などで構成される。これらのうち、レールと橋脚は主にコンクリートで作られており、他の土木構造物と同様、維持管理の対象となる。

土木構造物の維持管理における主な作業は、ひび割れなどの欠陥の発見および記録である。この作業を効率的に行う為に、3次元モデルを用意して、そこに情報を記録する Construction Information Modeling (CIM) という試みが行われている¹⁾。これにより、欠陥の視覚的で空間的な把握が容易になり、また電子データを用いることで、時系列的な管理や、危険度評価の自動化が可能になる。その結果、維持管理に要する工数の削減につながる。新規の構造物であれば、設計段階で作成した3D CADモデルが利用できる。一方、CADモデルが存在しないような既存構造物であれば、新たに3Dモデルを作成する必要がある。しかし、2Dの図面から3DCADを用いて、手

動で3Dモデルを作成することは非常にコストがかかる。一方、レーザースキャナや写真測量を用いて現物情報を3次元点群データとして取得することが可能となっている。そこからCADモデルに相当するモデルを作成できれば、構造物の3Dモデル生成が効率的になる。土木構造物は長大な構造をしており、また橋梁などは細かく複雑な構造をしている。写真測量は、膨大な枚数の複数視点からの写真が必要な点と、精度が低い点から、土木構造物全体を計測することに適さない。そのため、レーザースキャナから取得した点群データから3Dモデルを生成する方が効果的である。また、Mobile Mapping System (MMS) は速度や距離で取得する点の密度が変わるため、常に等速で、車線変更をしない計測条件が理想的である。また天候は曇りが最も適している。ノイズや欠損を避けるため、交通量が少ないタイミングに計測することが望ましい。

点群データから3Dモデルを生成する問題は、曲面再構成問題²⁾として知られており、多数の事例が存在する。しかし、従来手法によって生成される3Dモデルは、単一の不規則構造をもった密な三角メッシュである。これ

は、CIMに一般的に必要とされる3D CADで作成した規則的な構造を持った3Dモデルではない。構造物は複数のパーツ(部材)から構成されているため、3Dモデルも部材ごとに分けるほうが維持管理では有用である。既存のポリゴン化手法は、点群データを分割してポリゴンモデル化するものではないため、点群データをポリゴン化の前または後でセグメンテーション処理(領域分け)が必要となる。しかし、既存手法³⁾は対象が屋内やパイプなどに限定されており、形状がさまざまな土木構造物に対して一般化させることは困難である。また、計測できない部分(欠損)が、生成された3Dモデルにそのまま反映される問題もある。

Hidakaらは、土木構造物の幾何学的類似性に着目して、局所的形状マッチングによる類似領域(部材)検出と位置合わせによる部材の3Dモデルの配置を用いた計測点群データのポリゴン化手法を提案した⁴⁾。この手法は、適切なテンプレートを用意することで、連続して並ぶモノレールの橋脚部分の効果的なポリゴン化を実現した。しかし、この手法は、部材を配置することでポリゴン化を行っているため、レールのようなスイープ状の形状のモデリングには適さない。また、車両にレーザスキャナを搭載したMMSでモノレールのレール部分を計測しようとする、高い位置にあるレール部分にレーザーを完全に照射できないため、点群データに欠損が多く含まれる。そのため、既存のポリゴン化手法⁶⁾を適用すると、欠損を反映したポリゴンが生成されてしまう。

レールのように形状が特定されている場合は、それに特化したポリゴン化手法が有効になる。レールは断面を軌道に沿って押し出したスイープ構造であるため、レールの点群から軌道を計算し、それに沿って断面を押し出すことで、維持管理に適したポリゴンを効率よく作成できる。本論文では、モノレールを対象としたポリゴン化手法を提案する。提案手法は、レールの点群データからスイープに必要な断面と軌道を抽出し、ポリゴンを生成する。軌道を計算するために、レールが対称的な構造をしている点に着目し、局所的な対称構造を抽出することで、点群データからスケルトンを計算する。断面は、点群データと計算した軌道に垂直な面との交差を求めることで計算する。

提案手法は、断面と軌道が計算できれば、断面を利用することで、欠損を含む点群データに対して頑健にポリゴンを生成できる。また、スイープ操作によって規則的な構造のポリゴンが生成できる。規則的な構造は変状の記録や位置の特定が行いやすく、維持管理に適している。本論文では、提案手法を実際のレール点群データに適用することで、提案手法の有効性を検証する。

2. 既往研究

(1) 点群データからの曲面再構成

点群データを3Dモデル化する問題は、曲面再構成(Surface reconstruction)問題と呼ばれ、形状モデリング分野では、20年以上にわたり活発な研究がおこなわれている²⁾。代表的なアプローチは、入力点群のある地点で0となるような符号付きのスカラー場を定義し、その等値面を抽出する方法である。例えば、Poisson surface reconstruction⁶⁾は、点群データに対応した法線ベクトルを利用して陰関数を定義することで、点群を通る曲面を推定してメッシュを生成する。これらの手法の多くは、対象を限定しない一般的な手法であるが、生成される曲面は複雑な自由曲面を想定している。一方、対象を限定することで、対象の特徴やコンテキストを反映させた曲面生成を実現した研究例も存在する。例えば、川島らは、プラントの計測点群データ内から複雑に入り組んだパイプの部分を検出し、3D CADモデルと置き換える手法を提案した⁸⁾。この手法はパイプだけでなく、エルボやTジャンクションなどを位置関係から推定してモデル化している。Hidakaらの手法では土木構造物に類似した構造が独立して並んでいるということを前提に、幾何学的類似性に基づいた点群データからのポリゴン化手法を提案した⁴⁾。この手法は橋脚のような独立して立ち並ぶ構造に対して有効であった。

(2) スケルトン抽出

スイープ形状は、断面形状と、押し出す軌道から構成される。任意の幾何形状からスイープ構造を抽出するためには、軌道に相当する構造(本論文ではスケルトンと呼ぶ)を抽出し、入力形状とスケルトンに直交する面の交差から断面形状を計算すればよい。スケルトンとは、物体の中心を通る線である⁹⁾。スケルトンの計算方法には、中立軸変換(medial axis transform)を用いる方法¹⁰⁾、対称性を利用する方法¹¹⁾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、点群データから計算するには、前項で述べた曲面再構成が必要となる。また、モノレールのように欠損が多いデータに対して中立軸変換を適用することは困難である。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データの断面を求め、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¹²⁾。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。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¹³⁾。

3. モノレールの構成

本章では、モノレールの構成について、ケーススタディとして使用する大阪モノレールを例に説明する。大阪モノレールは、レールに車両が乗っている跨座式モノレールの1つである(図-1)。モノレールは、主にレール、橋脚、駅舎で構成されている。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る。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。またレールには、橋脚の上部に継ぎ目がある。

(a) モノレールの継ぎ目部分の拡大写真

(b) レール部分の断面図

図-1 モノレールの構造

4. レール点群データのポリゴン化手法

本章では、レールが対称性を持つスイープ構造であることを前提としたポリゴン化手法について述べる。提案手法は、モノレールのレール部分の点群データを入力とし、スイープによってポリゴンを生成する。図-2に提案手法の概要を示す。本手法では、スイープ形状生成に必要なスケルトンと断面を点群データから抽出する。はじめに、レールの点群データ(図-2(a))の対称性を基にスケルトンを検出する(図-2(b))。次に、スケルトンに垂直な面から断面を取得し、それをスケルトンに沿って押し出す(図-2(c))ことで連続性を保持したポリゴンを生成する(図-2(d))。次節にて、手法の詳細を述べる。

(1) スケルトンの抽出

はじめに、レールの対称性を利用して、点群データからスケルトンを検出する。点群データからスケルトンを検出する手法は複数あるが^{12), 13)}、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¹³⁾を利用する。図-3に Vanna らの手法の概略を示す。

はじめに、入力点群内で、各点 p_i の対蹠点 q_i を探す(図-3(a))。対蹠点とは、軸を挟んで反対側に位置する点である。 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 $\theta_{\max}$ 以上であり、かつ p_i と q_i の距離 d_i が $d_{\min}$ 以下である点である。複数候補がある場合はそ

図-2 提案手法の概要

の中の最近傍点を選択する。見つからない場合は、未定義とする。スケルトンの候補点 $S(c)$ は、 p_i と q_i との中点として定義する。

以上の方法で計算した候補点 $S(c)$ の点や密度には、線にはならず、ばらつきがある(図-3(b))ため、押し出

しを行うための1本の軌道として扱えない。そのため、 $S(c_i)$ を1本の軌道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-3(c))。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、ポリゴン化した際、点群データとの間に誤差が生じる。そこで、外れ値を除去し、更にラプラシアン平滑化により、候補点群データのばらつきを無くす(図-3(d))。平滑化後の点群データの各点に対して、主成分分析を点群データ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データを計算する(図-3(e))。

最後に、生成される3Dモデルの面数、頂点数を最小限にするため、サブサンプリングにより、点数を間引く(図-3(f))。サンプリングは、3章で示したレールの構造に基づき、モノレール橋脚を参考に行う(図-4(a))。この手法は、対象のレールを支える橋脚の点群データ、もしくは3Dモデルが個別に用意されている前提で行う。はじめに、モノレール橋脚の点群データもしくは3DモデルをXY平面上に投影し、重心 c 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、橋脚の点群データは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データ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 $v(c)$ と c を用いて面 $s(cv)$ を定義し、 $s(cv)$ と $S(c_i)$ との交点($s(cv)$ からの $S(c_i)$ 内の最近傍点を、 $s(cv)$ 上に投影したものを) $p(c_i)$ と定義する。これをすべての橋脚の点群もしくは3Dモデルについて行う。

橋脚を用いてスケルトンのサンプリングを行うと、橋脚と橋脚の間のレールが直線構造で生成される(図-4(a))。しかし、実際のレールの構造は、一般的に曲線である。そのため、実際のレールの構造にフィッティングさせる必要がある。各ユニット内で対応したスケルトンの候補点 $S(c_i)$ において等間隔 r_s でサンプリングを行う(図-4(b), 図-4(c))。

(2) 断面の検出

スケルトンと点群データから、押し出しに使用する断面を生成する。断面は、入力点群データ内から自動で取得する。スケルトンが得られている場合は、断面は、スケルトンに垂直な平面と入力形状が交差する断面を計算すれば良い。ただし、入力形状は点群データであるため、断面形状をとるために、断面を含む平面 s_c との距離 d_{sc} 以下である点を s_c に投影することで断面を構成する点

(a) 対蹠点とスケルトン候補点の決定方法

(b) スケルトン候補点

(c) 主成分分析

(d) ラプラシアン平滑化

(e) 主成分分析で局所的に1次元に変換

(f) サンプリング

図-3 スケルトン候補点の平滑化による単純化

群データを取得する(図-5)。この操作を、サンプリングされた頂点におけるスケルトンに垂直な面すべてに対して行い、複数の断面点群を取得する。本手法では、これらの幾何学的特徴量を計算し¹⁴⁾、その平均値に近い断面を代表断面として選択する。最後にスイープに扱える

断面にするために、断面点群データに対して、凸包によりポリゴン化した後、Ramer-Douglas-Peucker アルゴリズム¹⁵⁾を用いて、詳細化させる(図-6)。

本節で述べた手法は、入力点群データに欠損が多い場合に、正しく計算できない場合がある。その場合は、ユーザが、入力点群データや、写真、CAD データをもとに手動で作成する方法も考えられる。

(3) 断面のスイープによるポリゴン生成

ポリゴンデータは、前ステップで作成した断面をスケルトンに沿ってスイープさせることで生成する。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 $p(c_i) - p(c_{i-1})$ 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結んで面を張る(図-7)。

図-5 断面検出

図-6 断面点群データのポリライン近似

図-7 スイープ (真上から見た図)

5. 実験結果

(1) 概要

本研究では、提案手法を Windows のプログラムとして実装し、MMS で計測したモノレールの点群データに対してこのプログラムを適用し、提案手法の評価を行った。試作したプログラムは、C++ と PCL (Point Cloud Library¹⁶⁾ version 1.8.0 を用いて Windows 上で実装した。実験環境は、Intel®Core™ i7-3770K CPU @ 3.50GHz と 32GB RAM が搭載された PC である。

実験に使用した点群データは、大阪モノレール彩都線の阪大病院前駅～彩都西駅間(図-8)であり、Time of Flight 方式の MMS で計測した。このモノレールは、坂道の上にあるため、レール部分には高低差がある。モノレールの道路面からの相対的な高さは約 8~10m である。

図-8 モノレール写真

点群データは、モノレールだけでなく、隣接する家屋や、通行人など周辺の環境も計測しているため、実験で使った点群データは、これらを手動による簡単な除去処理によって削除している。この除去処理は点群データの規模や作業者の熟練度に依存するが、1人で1日かからない程度、本実験では1人で2時間程度である。実験では、計測した点群データの中から2区間の点群データを抽出して使用した。1つは、長さ 120m、カーブは1つで、高低差が少ないレールである(図-9(a))。もう1つのデータは、長さ 1km、複数の緩やかなカーブがあり、高低差がある(図-10(a))。これらのデータは同じモノレール線であり、レールの幅(約 1m)、高さ(約 2m)は共通している。また、レール上面および側面に、計測

できなかったことによって発生した多くの欠損があることが確認できる。3章で説明した側面レール、足場、送電線は、点群データの密度が低いため、ほとんど計測されなかった。

図-9, 10 にポリゴン化結果を示す。比較対象として、代表的なポリゴン化手法である Poisson Surface Reconstruction による結果を図-11 (a) に、凸包による結果を図-11 (b) に、Alpha shape による結果を図-11 (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かったため、法線の推定がうまくいかなかったのが原因である。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、ポリゴン化する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。表-1, 2 に生成したポリゴン数および誤差評価をまとめた結果を示す。ポリゴン数については、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。これは、提案手法を用いて、入力点群の点数の 10% 未満の頂点数でポリゴン化が行えたといえる。橋脚を用いてスケルトンのサンプリングを行ったため、端の部分はモデル化されていなかった。そのため、誤差の計算はモデル化が行えた範囲のみで行った。誤差はレール幅が約 1m であることを考慮すると、維持管理のための精度 5% の 5cm 以内に収まっていないことから、更なる改善が求められる。断面 C の誤差が比較的低いのは、誤差の計算方法が、点群の点から見て最近傍のポリゴンまでの距離の平均をとっているため、ポリゴンの占有領域が増えたことで必然的に距離が短くなったためだと予想する。計算時間は、スケルトンの算出がほぼ全ての割合を占めており、いずれの例題もスイープと断面の自動生成の計算時間は 0.01 秒以内である。

実験では、以下の4点について検証を行った。

- 欠損やノイズ、モノレールの規模に対する頑健性
- 断面の自動生成の精度
- スケルトンのサンプリング間隔とポリゴン化精度の関係
- 既存手法との比較

次節以降にて詳細を述べる。

(2) 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-9, 10 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(c) は大きな欠損の近くでは取得されていないため (図-12)、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-13 (a))。このような場合は、候補点 S(c) 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-13 (b))。

提案手法は、長大なモノレールの効率的なポリゴン化に有効である。図-10 (b) に 1km の長さを持ったレールの点群データをポリゴン化した結果を示す。このように、長大な点群データであっても、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データ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-14)。これは、点群データに含まれる欠損、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を行っていたが、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 $n_s=5.0$ のときのポリゴン化の結果と比較すると、カーブが多い領域 (図-10 (a)) の平均誤差は 21.2cm、直線構造が多い領域 (図-10 (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。

(3) 断面の自動生成の精度

本実験では、自動で生成した断面の精度について検証した。提案手法で生成した断面は、レールの形状を簡易的に示したものになり、点群データの密度が低いと詳細な構造は再現できない。そのため、維持管理に利用するためには、補助的に写真や図面を併用し、断面を生成する必要がある場合がある。仮に他の部材も精密に取得された点群データを使用する場合、提案手法では、中心レールの断面と側面レールの断面でクラスタリングを行う必要がある。また、自動生成した断面は対称性が考慮されていない。土木構造物内には対称性が数多くあるため、維持管理で変状を管理するためには対称性を補正する必

図-9 ポリゴンモデル化結果 (120m のレール)

図-10 ポリゴンモデル化結果 (1km のレール)

図-11 既存手法でのポリゴンモデル化結果

表-1 120mのレール点群のポリゴンモデル化結果

	r_s [m]	計算時間[s]	断面	頂点	面	誤差[cm]
提案手法	未設定	1.709	A	24	20	10.5
			B	72	60	10.8
			C	192	160	7.5
			自動	54	45	6.0
	10	1.661	A	48	44	8.7
			B	144	132	10.3
			C	108	99	5.5
			自動	384	352	5.5
	5	1.649	A	104	100	7.7
			B	312	300	9.7
			C	832	800	5.1
			自動	234	225	5.8
	2.5	1.716	A	148	144	8.2
			B	444	432	10.2
			C	1,184	1,152	5.2
			自動	333	324	6.1
			計算時間[s]	頂点	面	誤差[cm]
既存手法	Poisson surface reconstruction ⁷⁾		0.223	17,497	34,990	1.8
	凸包		0.084	239	474	21.5
	Alpha shape		0.334	8,096	86,964	0

表-2 1kmのレール点群のポリゴンモデル化結果

	r_s [m]	計算時間[s]	断面	頂点	面	誤差[cm]
提案手法	未設定	29.078	A	176	172	17.5
			B	528	516	18.7
			C	1,408	1,376	15.4
			自動	440	430	30.4
	10	30.640	A	348	344	18.8
			B	1,044	1,032	20.0
			C	2,782	2,750	15.6
			自動	870	860	18.7
	5	30.163	A	592	588	18.5
			B	1,776	1,764	20.0
			C	4,734	4,702	15.6
			自動	1,480	1,470	18.2
	2.5	30.030	A	880	876	19.0
			B	2,640	2,628	20.2
			C	7,040	7,008	15.7
			自動	2,200	2,190	18.8
			計算時間[s]	頂点	面	誤差[cm]
既存手法	Poisson surface reconstruction ⁷⁾		1.542	11,794	23,492	42.6
	凸包		0.242	152	300	50.3
	Alpha shape		2.528	43,959	175,169	1.2

要が出てくると考える。一方、手動で用意した断面（図-15）を利用することで、詳細な特徴を持った対称性を持つレールをモデル化できる（図-9 (b), (c), (d)）。手動による断面生成は、寸法の計測等が必要であるものの、設計するのは2次元の断面であり、簡単である。

(4) スケルトンのサンプリング間隔とポリゴン化精度の関係

本実験では、適切なサンプリング間隔 r_s 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 Hidaka らの手法⁹⁾で生成した橋脚の3DCADモデルを利用してサンプリングを行う。橋脚のモデルを図-16に示す。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 r_s には2.5m, 5.0m, 10.0mを設定し、サンプリングを行わ

図-12 欠損とスケルトンの候補点（赤い点）の関係

図-13 近似曲線を利用したスケルトンの連続性の補正

図-14 生成された3Dモデルのがたつきと誤差の関係（赤：最小，緑：最大）

図-15 断面

図-16 モノレール橋脚3Dモデル

ない場合も検証した。 r_s の値が大きい場合は、少ない面数でレールのスワイプ構造を近似した 3D 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、レール部の点群データが持つノイズや欠損に敏感になる(図-9(f))。また、直線構造に対してサンプリング数を多くすると、面数が増加するため、適応的なサンプリング法が必要になると考えられる。

(5) 既存手法との比較

既存手法(Poisson Surface Reconstruction, Alpha shape, 凸包)を用いたモデル化を行い、生成されたポリゴンと計測点群との差分(Hausdorff Distance で求める)と面数、計算時間の比較を行う。

図-11 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-9, 10)は、欠損の部分にも適切に面が生成されただけでなく、レールの曲線構造も反映したポリゴン化を実現できたことが確認できた。

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データ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データの点数が多いとき、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。

(6) 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データ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、同じ断面のスワイプ構造の 3D 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ざんの間隔が一定である。そのため、踏み栈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化できる。

6. 結論

本論文では、レールのスワイプ構造に着目し、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 3D モデルを生成する手法を提案した。軌道は、構造物の対称性をもとに計算し、軌道に対して垂直な面を使って断面を自動生成をする。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 3D モデル生成ができるようになった。また、検証実験を通じて、多くの欠損が含まれたレールの点群データであっても、規則的な面で形成された 3D モデルを生成できたことを確認した。

今後の展望として、精度向上のための点群データのノイズや欠損に対する頑健性の向上があげられる。特に、現在の実装は、点群データ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、単純なスワイ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、小さく細い部材のポリゴン化を行う点、属性定義や入力追加が必要な点などがあげられる。

謝辞：本研究で使用したモノレール点群データ、KUMONOS コーポレーション株式会社の協力によって計測した。本研究は、一般財団法人日本建設情報総合センター研究助成、科研費(Grant Number JP26-04368)の支援によるものである。

参考文献

- 1) Yabuki, N.: BIM and Construction Information Modeling (CIM) in Japan, Proc. of the International Conference on Computational Design in Engineering (CODE 2012), pp. 325, 2012.
- 2) 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 & M. Spagnuolo (Eds.), Eurographics 2014 - State of the Art Reports. The Eurographics Association, 2014.

- 3) Nguyen, A., and B. Le.: 3D Point Cloud Segmentation: A Survey, In 2013 6th IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), pp. 225-230, 2013.
- 4) Hidaka, N., Michikawa, T., Yabuki, N., Fukuda, T., and Motamedi, A.: Creating Product Models from Point Cloud of Civil Structures based on Geometric Similarity, Proc. of ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-4/W5, pp. 137-141, 2015.
- 5) Hidaka, N., Michikawa, T., Yabuki, N., Fukuda, T., and Motamedi, A.: Quality Enhancement Technique for Similarity-based Polygonization from Point Cloud, Proc. of 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, No. 85, 2016.
- 6) Kazhdan, M., Bolitho, M., and Hoppe, H.: Poisson Surface Reconstruction, Proc. of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing, pp. 61-70, 2006.
- 7) Kazhdan, M. and Hoppe, H.: Screened Poisson Surface Reconstruction, ACM Transactions on Graphics Vol. 32, No. 3, pp. 29:1-29:13, 2013.
- 8) 川島 千明, 金井 理, 伊達 宏昭 : 大規模環境レーザ計測点群からの配管システムの自動認識, 精密工学会誌, Vol. 78, No. 8, pp. 722-729, 2012.
- 9) Tagliasacchi, A., Delame, T., Spagnuolo, M., Amenta, N. and Telea, A.: 3D Skeletons: A State-of-the-Art Report, Computer Graphics Forum, Vol. 35, Issue 2, pp. 573-597, 2016.
- 10) Blum, H.: A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape, Models for the Perception of Speech and Visual Form, 1967.
- 11) Mitra, N. J., Guibas, L. J., and Pauly, M.: Partial and Approximate Symmetry Detection for 3D Geometry, ACM Transactions on Graphics, Vol. 25, No. 3, pp. 560-568, 2006.
- 12) Tagliasacchi, A., Zhang, H., and Cohen-Or, D.: Curve Skeleton Extraction from Incomplete Point Cloud, In ACM SIGGRAPH 2009 Papers, pp. 71:1-71:9, 2009.
- 13) Vanna, S., Kawata, H. and Kanai, T.: A Robust and Centered Curve Skeleton Extraction from 3D Point Cloud, Computer-Aided Design & Applications, Vol. 9, No. 6, pp. 869-879, 2012.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) Rusu, R. B. and Cousins, S.: 3D is here: Point Cloud Library (PCL), IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011, Available at: <<http://pointclouds.org> (Accessed 27 July 2016).>

(2016. 10. 27 受付)

DEVELOPMENT OF A POLYGONIZATION METHOD FOR RAIL STRUCTURES OF MONORAIL BY USING CENTER LINE AND CROSS SECTION

Nao HIDAKA, Takashi MICHIKAWA, Nobuyoshi YABUKI, Tomohiro FUKUDA, and Ali MOTAMEDI

This research proposes a method of polygonization by using point cloud of rail of monorail. It is not easy to polygonization of monorail due to its long and large structure. Especially, rails are difficult to scan by laser scanner because they are placed in very high. Therefore, it is not expected to efficiently polygonize of rail for maintenance. In our proposed method, a center line which is robust in defects of point cloud is extracted based on geometric symmetry. When the center line is calculated, polygon is created in easy by sweeping a cross section of input data along the center line. The proposed method enables not only to create well-formed polygons for maintenance but also to cover defects of input point cloud. In this paper, we also show results for point cloud data of monorail scanned by mobile mapping system to validate the proposed method.