

## (30) 地上レーザスキャナを用いた軌道中心線の推定

松下 孝星<sup>1</sup>・古井 良典<sup>2</sup>・山本 義幸<sup>3</sup>・中村 豪<sup>4</sup>・中村 栄治<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 非会員ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社 土木事業部  
(〒450-0002 名古屋市中村区名駅五丁目 33 番 10 号アクアタウン納屋橋)

E-mail: k-matshita@jrcc.co.jp

<sup>2</sup> 非会員ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社 土木事業部  
(〒450-0002 名古屋市中村区名駅五丁目 33 番 10 号アクアタウン納屋橋)

<sup>3</sup> 正会員愛知工業大学工学部土木工学科 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

<sup>4</sup> 非会員愛知工業大学基礎教育センター自然科学教室 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

<sup>5</sup> 正会員愛知工業大学情報科学部情報科学科 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

本研究は、地上レーザスキャナによる軌道中心線推定において、未だ確立されていない軌道領域の概略位置推定とレール長手方向ベクトルの概略推定手法の開発を目的とする。軌道領域の概略位置推定は、レールの高さを包含する許容距離で RANSAC を使用して、軌道領域を含む平面領域の抽出手法を開発した。レール長手方向ベクトル推定は、RANSAC で抽出した平面領域において直線性を評価して決定する手法を開発した。ここでは、鉄道構造物は、レールに平行で作られているものが多いという知識ベースを背景に、高直線性を有す点群データを抽出した。それより、再度 RANSAC にて直線を抽出し、レール長手方向ベクトルの概略推定を行った。結果として、軌道領域を含む点群データの取得、ならびにレール長手方向ベクトルの概算値となる直線を抽出できた。

**Key Words:** *terrestrial laser scanning, railroad centerlines, RANSAC, linearity*

### 1. 序論

地上型レーザスキャナ (TLS: Terrestrial Laser Scanner. 以降、TLS と称す。) は、高性能・低価格となり、その使用ポテンシャルは大きく向上している。しかしながら、TLS による軌道中心線の推定は、オーソライズされた自動化手法が実務で利用される状態には至っていない。軌道中心線推定の先行研究<sup>1)</sup>・実利用<sup>2)</sup>は、MMS (Mobile Mapping Systems) で実施されている。これにおいては、車両に取り付けられたレーザスキャナで、走行しながら観測される。よって、これで観測される点群データは、レールに沿って観測されたものとなる。そのため、軌道中心線の推定問題は、軌道中心線が元来レールに沿うものであるため、その関係 (MMS の移動軌跡など) を糸口としたアプローチにより容易となる。これに対して、TLS による点群データは、観測位置と軌道の幾何学的関係が一定で取得されることが現実的に難しい。そのため、TLS 観測の点群データは、MMS 観測の点群データと異なるアプローチが求められる。

TLS データから軌道中心線を推定するためには、特に、レールの概略位置推定が主命題となる。MMS では、観測位置 (移動軌跡) が GPS, IMU 等で推定されており、

これが概略位置と等価とみなせる。これに対して、TLS での概略位置は、一般的な観測方法では得られない。この TLS での概略位置推定でのアプローチとしては、現地観測 (測量)、点群処理の2つが考えられる。現地観測では、トータルステーションなどによる測量によって概略位置の座標を取得できるようになるが、安全性の観点から、軌道内作業の増加は望ましくない。元来、軌道空間での TLS の利用は、安全性の向上が目的の一つでもあることから、アプローチとしては点群処理が有力となる。

点群処理による概略位置推定手法として、次元削減、セグメンテーション、知識ベースなどが考えられる。次元削減については、具体的には、空間→面→線という遷移において、それぞれの次元で取得しやすい特徴を利用して、対象とする軌道領域の範囲を特定していくフローとなる。これにおいては、ロバスト推定の一環である Random Sample Consensus (RANSAC)<sup>3)</sup>が有効な次元削減アルゴリズムとして使用される。これは、外れ値に影響されないように、確率的にサンプリングする手法である。点群データに対しては、RANSACによって平面をなす点群の抽出<sup>4)</sup>に利用されている。知識ベースは、対象空間において既知な情報を利用して抽出処理を施すもので、エキスパートシステムの根幹となるアルゴリズムである。点群データにおいては、例え

ば、抽出したい対象において、既知の高さ情報により処理を行うなどがある。その仕組みから、汎用性にかける側面を有すが、適切な機械学習手法が見いだせない場合に、その代替手段として簡易な処理プログラムで効果的な抽出を行うことを可能とする。以上から、有用で頑健なオープンソースの提供状況も鑑みると、次元削減・セグメンテーション・知識ベースによるアプローチによって、軌道領域の概略位置推定システムの開発が可能と考える。

軌道領域の概略位置推定後は、レールの線形推定のステップとなる。これにおいては、これまでの取り組み<sup>5)</sup>で有用性を確認した Iterative Closest Point (ICP)<sup>6)</sup>が有力な手法として挙げられる。ICPは、ペアとする点群モデル間において、近い点を探索するアルゴリズムである。よって、点群モデルのフィッティングに利用される。ICPによるレールの線形推定ステップは、実観測で得たレールの点群データに対して、レールの部分的な点群モデルをフィッティングさせて、その位置から線形を推定するプロセスとなる。しかしながら、ICPによってモデル間の対応を繰り返し計算する際に、初期値が後々のフィッティング精度に関わる<sup>7)</sup>ことが明らかになっている。これにおいては、レールの点群パーツの方向ベクトルの近似値を取得して、初期値として与える方法が考えられる。

最終的に、軌道中心線の推定は、上述の部分的な点群モデルから求めることが可能となり、これにおいては、TLSおよびMMSの点群データともに同様なアプローチとなる。よって、TLSにおける軌道中心線推定においては、

- ・軌道領域の概略位置推定
- ・レール長手方向ベクトル推定

のための手法の開発が命題となる。

本研究は、TLSによる軌道中心線推定において、未だ確立されていない軌道領域の概略位置推定とレール長手方向ベクトルの概略推定手法の開発を目的とする。軌道領域の概略位置推定は、RANSACを使用して、軌道領域を含む近似平面領域の抽出手法を開発する。レールの方向ベクトル推定は、上記にて抽出した軌道領域において直線性を評価して決定する手法を開発する。

## 2. TLSによる軌道領域とレール長手方向ベクトルの概算手法

図-1は、点群データから軌道領域とレール長手方向ベクトルを概算するフローである。本研究で取り組んでいるプロジェクトの最終ゴールは、軌道中心線の推定である。これを念頭に、本稿では、軌道中心線の推定での初期値に関与するレール長手方向ベクトルの概算手法の

確立を目的とする。概算フロー(図-1)のとおり、複数のTLS観測データにおいて、計算コストを軽減するために、点群データのダウンサンプリングを行う。この処理のあと、RANSACによる平面抽出、高直線性領域の抽出を行い、これより、軌道領域とレール長手方向ベクトルの概算を行う。以下に、使用データおよび各処理の概要について述べる。

### (1) 使用データ

FARO製のTLSのFocus3Dで観測した点群データを使用した。観測では、後処理にて観測点群を結合する際の基準とするために、白球を設置した。なお、この点群データは、全体的な三次元空間情報を取得するために、8箇所観測した点群データを、白球を基にレジストレーションしたものである。点群数は、549,515,483点である。

### (2) ダウンサンプリング

TLSによって得られた点群データは、点群数が多く、処理時間が大幅にかかる場合がある。処理内容によっては、すべての点群が必ずしも必要でない場合があり、それにおいては、ダウンサンプリング(間引き処理)を施した点群データを使用した方が効率が良い。ここで使用する点群データは、5億点ほどであり、ワークステーションレベルでも処理時間が長くなる場合がある。概略値の取得が目的であり、正確さは要求されていないことから、ダウンサンプリング済みの点群データを使用することとした。

ダウンサンプリングは、Open3DのVoxel downsamplingを使用した。ここでは、一辺が0.1mのボクセル内の点群を1つの点にする処理を行った。ダウンサンプリング後の点群データを図-2に示す。なお、この点群データの点群数は、3,127,082点で1/175程度の圧縮となった。

### (3) 平面の抽出(軌道領域の概略位置抽出)

点群データからの平面抽出はRANSACを使用した。RANSACは、外れ値の影響を軽減して、平面を抽出することを得意とする。そのアルゴリズムは、まず、抽出対象空間において、それを求めるのに必要な点群(直線なら2点、平面なら3点)をランダムにサンプリングする。そして、サンプリングごとで決定した抽出対象空間(許容範囲を含む。平面なら法線方向のバッファ内)に存在する点群(inlier)において、その点群数が最大になる場合の抽出対象空間を最適解とする。軌道領域の概略位置抽出は、上述のRANSACによる平面抽出を基本とし、許容距離をレールの高さを包含する値の20cmとして行った。

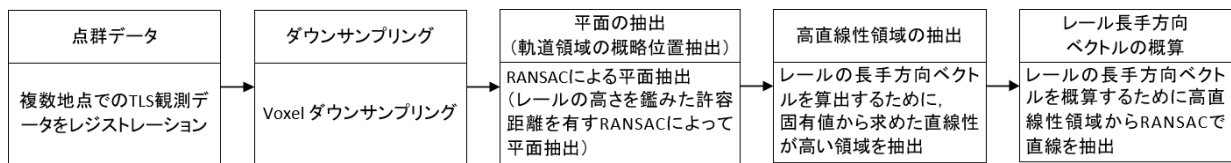


図-1 処理の流れ

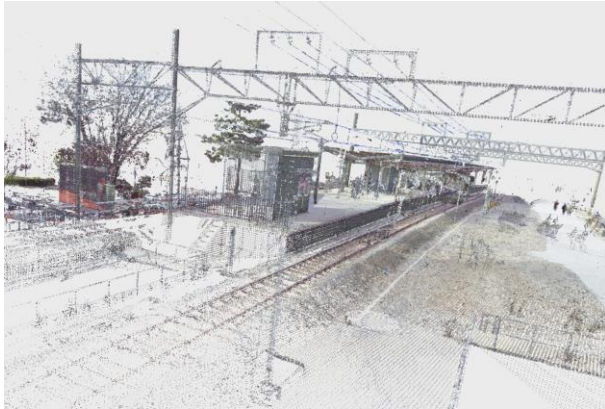


図-2 ダウンサンプリング後の点群データ

#### (4) 高直線性領域の抽出

レールの長手方向ベクトル推定は、RANSACで抽出された平面の点群データを利用する。平面の点群データのうち、できるだけ直線性 $L$ を有すものを選び、それから再度RANSACにて直線を抽出する手法が考えられる。そこで、半径探索(半径25cm)で近傍点を抽出し、

$$L = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1} \quad (1)$$

で、直線性 $L$ を求め、その値が高い点群からなる高直線性領域を抽出した。式(1)の $\lambda_1, \lambda_2$ は、近傍点の $3 \times 3$ の分散共分散行列における固有値( $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ )である。

#### (5) レール長手方向ベクトルの概算

レール長手方向ベクトルは、高直線性領域の点群においてRANSACで抽出した直線から概算することとする。基本的に、鉄道の構造物は、レールに平行するように作られているものが多く、ここで取得された直線は、概ね、レールの長手方向ベクトルと近似しているものと考えられる。このあたりは、知識ベースのアプローチによるものである。よって、これより得たレール長手方向ベクトルを利用すれば、軌道中心線の推定での線形モデルへのフィッティングにおいて大域的最適解に収束しやすくなるものと考えられる。

### 3. 結果・考察

軌道領域の概略位置の抽出で、RANSACによる平面抽出を応用する方針において、キーとなるのは、許容距

離である。図-3は、許容距離を20cmとして、すなわちレールの高さを包含する値で抽出した結果である。一方で、図-4は、許容距離を1cmとした結果である。いずれも右図の点群において抽出された平面を左図上に赤色で示している。図-3に示されているとおり、許容距離20cmとした場合は、1つ目の抽出平面で、レールを含む軌道領域が抽出された。一方で、許容距離を1cmとした場合は、図-4のように、許容距離が小さいため、レールを含む軌道領域を網羅的に抽出できないことが示された。

図-5のように、直線性を有す平面点群データを選定した。これにおいて、図-6のように直線性を計算した。さらに、これより、図-7のように直線性が高い点群の抽出を行った。なお、図-5の段階で、RANSACによって直線を抽出すると、望ましい直線を得ることはできなかった。高直線性領域の点群においては、RANSACで、図-8のように直線を抽出することができた。以上によって、レール長手方向ベクトルの概算値が得られた。

### 4. 結論

RANSACでレールの高さを考慮した平面抽出、ならびに直線性の評価によって、目的とする「軌道領域の概略位置推定」、「レール長手方向ベクトル推定」が行えることが示された。各々の処理結果については、観測地や観測点群データによって変動の可能性は有している。特に、「鉄道構造物は、レールに平行に作られている」という知識ベースで行っているため、この考えに沿わない空間などについて検討・整理が必須である。

本研究の取り組みの最終ゴールは、軌道中心線の推定法の確立である。軌道中心線の推定においては、軌道領域を抽出し、レール長手方向ベクトルまで明らかにできれば、線形のフィッティング処理手法が適用可能となる。これにおいては、マニュアルで、レールの点群パーツを合わせながら、収束させる手法も可能であり、適宜、フィッティング誤差を確認しながら行うようなアプリケーションの開発を進める予定である。

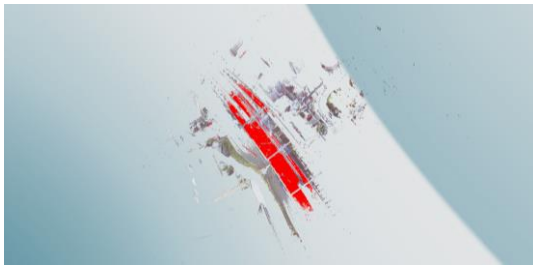


図-3 平面抽出結果：許容距離20cm

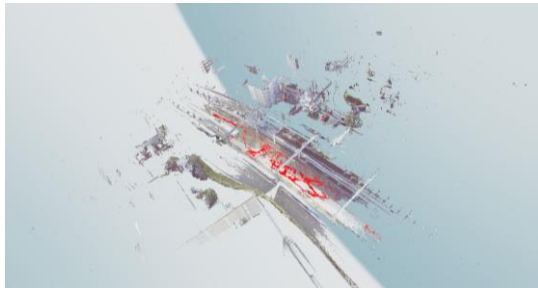


図-4 平面抽出結果：許容距離1cm

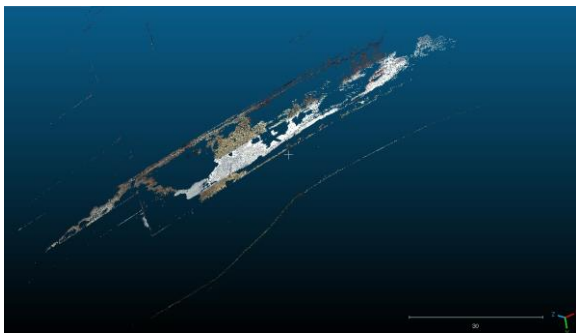
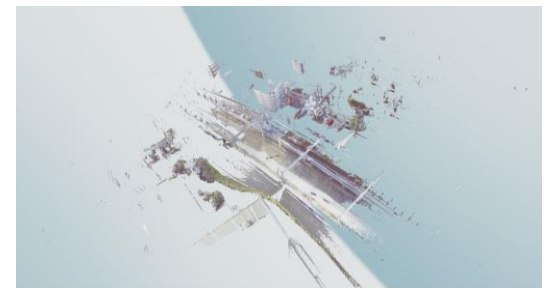


図-5 直線性を有す抽出平面

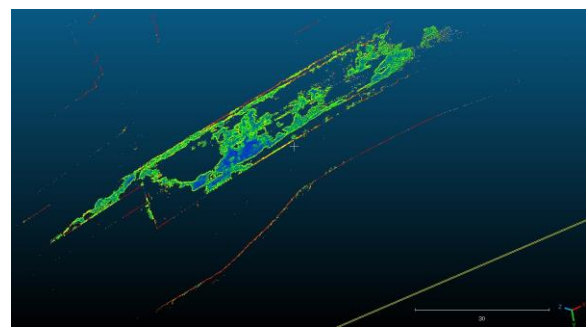


図-6 直線性の評価結果（赤色は直線性が高く、黄色～緑色～青色にかけて直線性が低い点群を示す。）

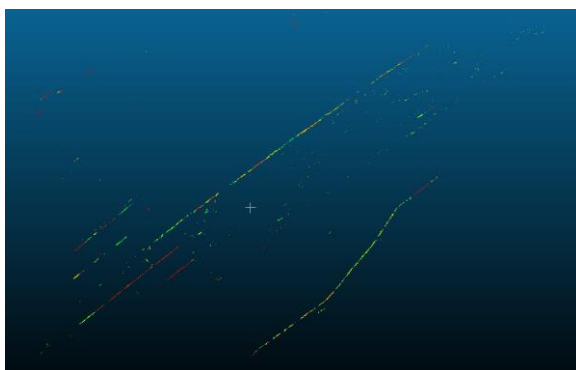


図-7 高直線性領域の抽出結果

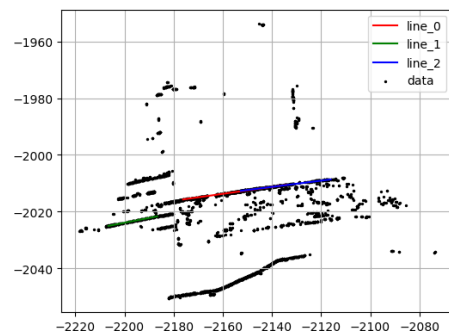


図-8 RANSACによる直線の抽出結果（ここでは、3つの直線を抽出している。）

## 参考文献

- 1) 山本耕平, 矢尾板啓, 矢吹信喜: 2 台のレール直上レーザスキャナを用いた鉄道建築限界モデル作成手法に関する研究, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.74, No.2, pp. I\_70-I\_81, 2018.
- 2) ライカジオシステムズ: Leica Pegasus: Two モバイルマッピング・ソリューション, <[https://leica-geosystems.com/ja-jp/products/mobile-mapping-systems/capture-platforms/leica-pegasus\\_two](https://leica-geosystems.com/ja-jp/products/mobile-mapping-systems/capture-platforms/leica-pegasus_two)>, (入手 2022.6.8).
- 3) Fischler, M. A. and Bolles, R.C.: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Commun. ACM.*, Vol.24, Issue 6, pp. 381-395, 1981.
- 4) 稲富翔伍, 全 邦釘: 3次元モデル生成のための構造物表面取得に関する基礎的検討, AI・データサイエンス論文集, 2 巻, J2 号, pp. 428-436, 2021.
- 5) 松下孝星, 古井良典, 後藤隆二, 山本義幸, 中村 豪, 中村栄治: ICP によるレールの点群の位置合わせにおける位置の初期値特性, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第 24 号, pp. 77-84, 2020.
- 6) Besl, P. J. and McKay, N. D.: A method for registration of 3d shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, Issue 2, pp. 123-140, 1992.
- 7) 増田宏: 大規模点群のための処理技術, 計測と制御, 60 巻, 10 号, pp.716-720, 2021.