

論文 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

松下 孝星¹・古井 良典²・後藤 隆二²・
山本 義幸³・中村 豪⁴・中村 栄治⁵

¹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 愛知県名古屋市中村区名古屋駅五丁目33-10 アクアタウン納屋橋)

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

²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 愛知県名古屋市中村区名古屋駅五丁目33-10 アクアタウン納屋橋)

³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)

⁴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)

⁵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)

本研究では、Iterative closest point (ICP) によるレール点群の位置あわせでの初期値特性を明らかにすることを目的とした。初期値で並進・回転ずれをシミュレートしたレール点群でICPによる位置合わせを行った。また、適切な点群密度についても調べた。結果として、次のことが分かった。1) 並進ずれに関しては、ずれ量に関係なく、点群密度が2 cm四方に1点以上、2) また、平面図ならば、点群密度が4 cm四方に1点以上、3) 回転ずれに関しては、現実的なカントや縦断勾配ならば、点群密度が2 cm四方に1点以上、4) また、平面図ならば、点群密度が4 cm四方に1点以上で誤差なく位置合わせができる。

Key Words : ICP, rail, point cloud, positional initial value

1. 序論

レールの位置は、鉄道施設の維持管理において、安全性を左右する、特に、重要な情報の一つである。昨今では、現況のレール位置を取得するためにレーザスキャナが利用されている。レーザスキャナは地物の空間情報を取得できる。この空間情報は、三次元座標データで、いわゆる点群データと称されている。しかしながら、レーザスキャナでレールを観測するとレール表面全体の点群を得られない場合がある。その程度によってはレールと認識できず、位置を正確に定めることができない場合がある。そこで、先行研究^{1,2)}では、これを解決するために、Iterative closest point (ICP) ³⁾を利用している。これらでは、ICPで、理想的なレールの点群を観測レール点群に位置合わせをし、補完することで、レール位置を求める方法をとっている。ICPは、2つの点群データでの対応点間距離が最小になるように位置合わせを行う手法である。一般に、位置合わせの際に基準とする点群を「モデル点群」、モデル点群に重なるように変換が施される点群を

「データ点群」と呼ぶ。ICPには、初期値によっては大域最小解に収束せず位置合わせ誤差が大きくなる短所がある。よって、初期値を適切に設定しなければならない。しかしながら、モデル点群にできるだけ合うようにデータ点群を配置する（位置の初期値を決める）ためには計算量を多く必要とする場合があり、おおよそ近い位置に配置してICPで計算させた方が、結果的に位置合わせを早く終わらせるケースもある。一方、そのおおよそ近い位置が、どの程度ずれていてもよいかが明らかになっていないため、上述のとおり、位置合わせに失敗するときがある。著者らの予備実験においても、レールのデータ点群において、位置の初期値（変換行列の初期値は単位行列）によっては大域最小解に収束しないことを確認した。このことは、ICPを利用したレール位置計算システムに頑健性と自動化を求めるならば、看過できない。本論文でのレール位置とは、レール形状も含んだ現況のレール位置のことであり、軌道変位も反映される。レーザスキャナを導入する目的は、作業の安全性確保（線路内作業の削減）や作業効率化等を最終目標にした手段の

基礎のためである。軌道中心は、レーザスキャナで得た現況レール形状の欠測部分をICPで補完して求めたレール位置から求めることにしている。レーザスキャナは、図-1のとおり、ホーム上（点字ブロック内方）や建築限界外の安全な場所で複数個所に設置する。求める点群密度や精度に応じてレーザスキャナを配置する。しかしながら、死角等によるデータ欠損が発生するため、それをICPで補完するシステムとしている。最終的には、リアルタイムでの自動処理を想定しており、そのためにはICPで正しく収束させるための条件を明らかにしておく必要がある。よって、初期値特性を明らかにすることで、鉄道施設の維持管理でのレーザスキャナの活用における技術的課題が一つクリアとなる。そして、これは、最終的には鉄道の安全・安定輸送の確保に通じる重要な取り組みと考える。

そこで、本研究では、ICPによるレール点群の位置合わせでの初期値特性を明らかにすることを目的とした。原点にバウンディングボックスの中心があるレール点群（モデル点群）とそれを並進ならびに回転移動させ意図的に位置をずらしたレール点群（データ点群）とでICPによる位置合わせ実験を行った。なお、現地においてレーザスキャナで計測したレール点群を「モデル点群」、実験上の評価のため人工的に（シミュレートして）作成した理想的なレール形状の点群を「データ点群」としてモデル点群に重なるように変換し位置合わせし、それらを連結しレール位置の図面を作成することを想定している。これで、ICPでの位置合わせがうまくいけば、このデータ点群は、モデル点群に重なり（フィット）、中心位置も原点に一致することになる。すなわち、そのフィッティング状態と中心点の差で位置合わせ結果を評価できることになる。また、適切な点群密度についても調べた。1 cm～5 cm四方に1点の計5種類の点群密度のレール点群をモデル点群とした。そして、1 mm四方に1点の点群密度を有すレール点群を並進・回転移動させた計18種類のデータ点群として計90パターンでの位置合わせ実験を行った。

2. レール点群の作成とICPによる位置合わせ実験方法

本研究目的に対し取り扱う手法は、下記の3つである。

- ・ ICP
- ・ レール点群の作成
- ・ ICPによる位置合わせ実験方法

以下に、ICPの概要とこれらの詳細について記述する。

(1) ICP (Iterative closest point)

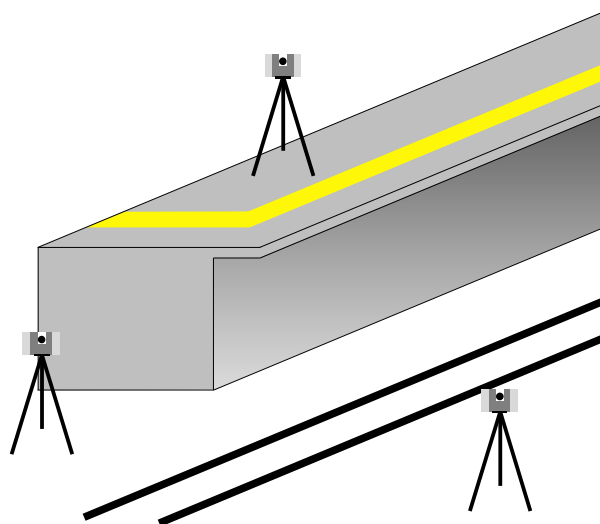


図-1 レーザスキャナによるレール位置取得方法の概略図

ICPは、Besl⁹⁾らに示された点群の位置合わせ手法である。一般に、位置合わせの際に基準とする点群を「モデル点群」、モデル点群に重なるように変換を施される点群を「データ点群」と呼ぶ。この2つの点群データの対応点間距離を最小化するようにデータ点群を並進・回転させる変換行列を反復繰り返し計算して求め、位置合わせを行う。ここで、モデル点群Pとデータ点群Qで対応する点の集合を $K = \{(p, q)\}$ 、変換行列をTとすると目的関数 $E(T)$ は次式で表される。

$$E(T) = \sum_{(p,q) \in K} \|p - Tq\|^2 \quad (1)$$

ICPでは、この目的関数 $E(T)$ において必ず局所最小解に収束するが、それが大域最小解であるかは初期値次第である⁹⁾。なお、大域最小解に至って重なるための初期値の範囲は、形状に依存するため一般的に定義できない。よって、レールに関して、この点を明らかにしようというのが、本研究の骨子である。なお、本解析では、変換行列の初期値は単位行列とした。ICPにおける初期値は、この変換行列とデータ点群の位置のコンビネーションになる。しかしながら、本解析のように、変換行列の初期値を単位行列かつモデル点群の位置を原点とすることで、データ点群の位置が、モデル点群とデータ点群の相対位置を示すこととなる。そして、それで計算することで、モデル点群とデータ点群の相対位置の初期値がICPでの収束結果にどのような影響を及ぼすかを明らかにできる。なお、ICPは、オープンソースのOpen3D⁹⁾を使用して計算した。Open3Dでの最適化手法はガウス・ニュートン法が採用されている。

(2) レール点群の作成

本解析では、現地計測のレール点群の適正な点群密度を理論的に調べるために、現地計測のレール点群（モデ

ル点群)もシミュレートして作成した。以下に、シミュレート方法と、異なる位置の初期値をとるように並進・回転移動させた(意図的な初期位置ずれを発生させた)レール点群(データ点群)の作成方法について述べる。

a) 3DCADを利用したレール点群のシミュレート

位置合わせ実験で使用するレール点群は、50 kgNレールの3DCADを使用してシミュレートし作成した。シミュレートにおいては、点群密度を指定し作成した。レールの3DCADは、図-2、図-3に示すように長手方向500 mm(以降、500mm3DCADと称す)と100 mm(以降、100mm3DCADと称す)の2種類用意した。これらの3DCADの本解析上での位置づけを表-1に示す。本解析では、500mm3DCADを現地観測のレーザスキャナ観測データ(モデル点群)のシミュレート用に用いた。500mmという長さは、重なるように変換していくデータ点群(後述する長手方向100 mmの点群)が変換過程で長手方向に移動してもモデル点群から外れない程度の長さとして設定したものである。また、100mm3DCADは、現地観測データを補完するために重ね合わせるデータ点群をシミュレートするために用いた。この100 mmという長さは、あまり長すぎると、基準とするモデル点群の曲率等が影響する可能性があるため、それが影響しない程度と想定した長さである。なお、これら3DCADの底面及び断面は、現実的にレーザスキャナで観測できないので、削除した。また、レーザスキャナ位置や照射角により、得られる点群の濃淡の違いや位置誤差が考えられる。今回は、これらについては、考慮していない。よって、今後、現地観測を通じて詳細を明らかにして、その影響について検証する予定である。

3DCADからのシミュレートは、点群処ソフトのCloudCompareで行った。このソフトでは点群密度を指定して点群化できる。そこで、表-1に示すような点群密度で点群化した。「モデル点群」は、現地でレーザスキャナ観測した点群データ(以降、500 mm点群)を想定しているので、現実的に取得可能(多方向からの複数回の観測)な点群密度を設定した。一方、100mm3DCADから作成する点群データ(以降、100 mm点群)は、ICPで500 mm点群に重なるように合わせていく「データ点群」で、位置合わせ誤差が小さく適切な対応点が含まれるようにするには500 mm点群よりも同程度以上の点群密度を持つことが望ましい。そこで、本解析では500 mm点群に設定したいずれの点群密度よりも高い密度である1 mm四方に1点という点群密度を100 mm点群に設定した。50 kgNレールの3DCADから点群化でシミュレートしたモデル点群の一部とデータ点群を図-4から図-7に示す。

b) 異なる位置の初期値を有すデータ点群の作成

本研究の目的である位置の初期値特性を調べるために、本解析では、ICPでの「データ点群」となる100 mm点群



図-2 レールの3DCAD(長手方向500mm・現地でのレーザスキャナ観測データを想定)



図-3 レールの3DCAD(長手方向100mm)

表-1 作成したレール点群

ICPでの点群の位置づけ	長手方向長さ(mm)	点群密度
モデル点群 (現地でのレーザスキャナ観測データを想定)	500	1点/cm ² (1 cm四方に1点)
		1点/4 cm ² (2 cm四方に1点)
		1点/9 cm ² (3 cm四方に1点)
		1点/16 cm ² (4 cm四方に1点)
		1点/25 cm ² (5 cm四方に1点)
データ点群	100	1点/mm ² (1 mm四方に1点)

を並進・回転移動して、異なる位置の初期値とするデータ点群を作成した。並進・回転移動の基準として、100 mm点群のバウンディングボックス(対象物にフィットさせた直方体)の中心(以降、中心点と称す)を原点とした3次元直交座標系を設定した。これは、図-8に示すとおり、3軸がレール長手方向、長手方向に対して直角・水平方向(以降、長手-直角・水平方向と称す)、鉛直方向の直交座標系となっている。この座標系において表-2に示すような並進・回転移動させた計18種類のデータ点群を作成した。これらにおいて、並進移動では、各方向のレール長の3分の1の長さ毎に移動させた。よって、初期値で、モデル点群に対して部分的に重複する位置にある2つのデータ点群、モデル点群と接する1つのデータ点群、モデル点群から離れた位置にある1つのデータ点群の合計4つのデータ点群を方向毎に作成した。なお、長手方向への並進移動は、データ点群はモデル点群に沿って移動するだけ(フィットしたまま)のため、対象としなかった。回転移動では、各軸に対して45°ずつ回転移動させたデータ点群を作成した。各軸でのレールの線対称性から、基本的に180°までの回転でそれ

表-2 並進・回転移動でのデータ点群の移動量（モデル点群からのずれ量）

移動方法	移動量（ずれ量）		
	長手-直角・水平 （方向長127 mm）	長手	鉛直 （方向長153 mm）
並進（mm）	42, 85, 127, 169		51, 102, 153, 204
回転（°）	45, 90, 135, 180	45, 90, 135, 180	45, 90

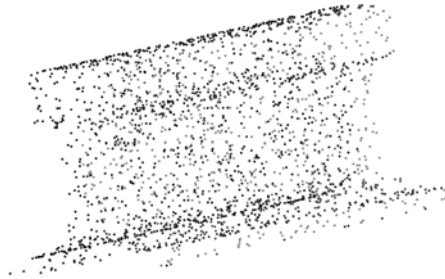


図-4 モデル点群（1点/cm²（1 cm四方に1点））

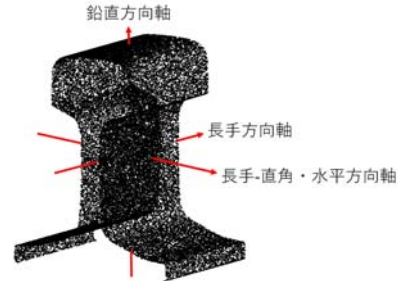


図-8 レールでの座標系の設定



図-5 モデル点群（1点/9 cm²（3 cm四方に1点））



図-6 モデル点群（1点/25 cm²（5 cm四方に1点））



図-7 データ点群（1点/mm²（1 mm四方に1点））

以上の回転移動の結果も同じになるので、各軸方向の回転移動は45°、90°、135°、180°の4種類とした。ただし、鉛直方向に対して135°の回転移動は45°と同じ、180°の回転移動は、結果として元と同じになるので対

象としなかった。データ点群の一例を、図-9から図-13に示す。なお、これでは、1点/cm²の点群密度のモデル点群も位置関係を明示するため表示する。

(3) ICPによる位置合わせ実験方法

ICPのレール位置の初期値の違いによる位置合わせ特性を前述のモデル点群とデータ点群を使用して調べた。ICPは、オープンソースのOpen3D³を使用して実行した。ICPで位置合わせする方法は2種類ある。2つの点群データの対応点間を対象にする方法（point to point）と、点と面を対象にする方法（point to plane）である。本解析では、point to pointのみで処理を行った。point to planeを行うには、それに必要な法線の計算パラメータの検討等、さらなる諸考慮が必要なため、これらについては、今後の課題とした。なお、念のため実施した予備検討ではpoint to pointによる結果の方が位置合わせ精度は高かった。ICPでの繰り返し計算回数は50回とした。対応点の探索における探索距離の閾値は、モデル点群とデータ点群の距離を十分に包括でき対応点を探し得る数値として500 mmと設定した。位置あわせ結果は、モデル点群と、位置あわせ後のデータ点群の中心点の差で評価した。且つ、それらの可視化で重なり（フィット）を評価した。データ点群は、もともと、モデル点群と同じ中心点で、且つ、重なっていたものを、意図的に並進・回転移動したものである。よって、ICPでその際の変換行列を推定し、元の位置に戻りフィットするのが理想である。今回の実験で設定した18種類の異なる初期値のデータ点群は、もちろんこれらで全てのケースを代表できているわけではない。特に、回転ずれに関しては、現実的には、より詳細なずれ量での実験が必要と想像しているが、くまなく調べるには多大な時間がかかるため、今回は、感度を見る



図-9 並進移動（長手-直角・水平方向42mm）



図-10 並進移動（鉛直方向102mm）

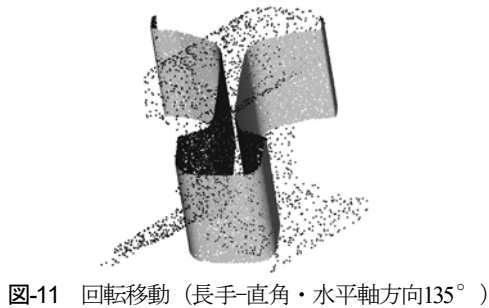


図-11 回転移動（長手-直角・水平軸方向135°）



図-12 回転移動（長手軸方向180°）



図-13 回転移動（鉛直軸方向45°）

ために大きめのずれ量を設定した。ゆえに、代表性を持ったデータ点群の作成については、今後も引き続き検討する必要がある。今回のケースでは、例えば、並進移動と回転移動の両移動を施した初期値を持つデータモデルは作成していない。これらについては、今回設定し実施した実験結果から、それらの初期値特性を推察することとした。

表-3 位置合わせ結果

点群種	モデル点群	データ点群初期値				
		移動方法	移動量 (ずれ量)	並進方向・回転軸		
				長手- 直角・水平	長手	鉛直
点群密度	1点/cm ² (1cm四方に 1点相当)	並進	全て	◎	△	◎
		回転	45°	◎	◎	◎
			90°	◎	×	◎
			135°	×	×	△
			180°	×	×	△
	1点/4cm ² (2cm四方に 1点相当)	並進	全て	◎	△	◎
		回転	45°	○	○	○
			90°	○	×	○
			135°	×	×	△
			180°	×	×	△
	1点/9cm ² (3cm四方に 1点相当)	並進	全て	●	△	●
		回転	45°	●	●	●
			90°	×	×	●
			135°	×	×	△
			180°	×	×	△
	1点/16cm ² (4cm四方に 1点相当)	並進	全て	△	△	△
		回転	45°	△	△	△
			90°	×	×	×
			135°	×	×	△
			180°	×	×	△
	1点/25cm ² (5cm四方に 1点相当)	並進	全て	×	△	×
		回転	45°	×	×	×
			90°	×	×	×
			135°	×	×	△
			180°	×	×	△

3. 結果・考察

表-3が、モデル点群の点群密度別にとりまとめたデータ点群の位置の初期値に対するICPの位置合わせ結果である。並進の移動量（ずれ量）については、どの移動量でも位置合わせ結果が同じであったため、表中には各々の移動量を明記せず、「全て」と記載した。それぞれの位置合わせ結果では、mmレベルで、モデル点群とデータ点群の中心点差が計算されているが、それとフィッティングの状況をまとめて◎○●△×の五段階で評価した。表-4に、この五段階の評価基準を示す。評価基準のポイントは、中心点差とフィッティング状況ならびに平面図が作成できるかである。図-14に、◎評価となった位置合わせ結果例を示す。この評価結果は、図のとおりモデル点群とデータ点群がフィットしており、中心点差も0mmであった。図-15に、○評価となった位置合わせ結果例を示す。この評価結果は、長手方向に数mm～60mm程度中心点差はあるが、図のとおりモデル点群とデータ点群がフィットしており、位置合わせに問題がないこと



図-14 位置合わせ結果 (◎評価例)



図-15 位置合わせ結果 (○評価例)

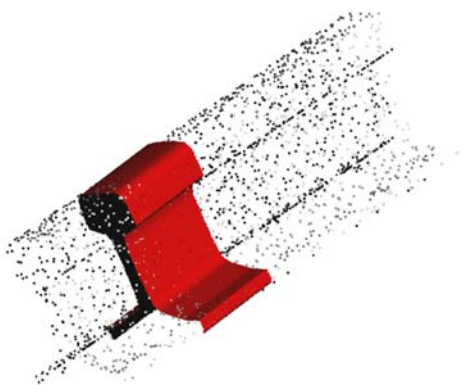


図-16 位置合わせ結果 (●評価例)



図-17 位置合わせ結果 (△評価例)



図-18(1) 位置合わせ結果 (×評価例：長手方向90° 回転)

表-4 位置合わせ結果の評価基準

◎	三軸方向ともに位置合わせ結果での中心点差が0 mm
○	長手方向に数mm～60 mm程度の中心点差があるが、他の二方向は中心点差が0 mm
●	長手方向に80 mm程度の中心点差、鉛直方向に1 mm程度の中心点差はあるが、長手-直角・水平方向の中心点差は0 mmで、平面図は誤差なく作成できる
△	フィットリングできてなく、長手方向に60 mm程度の中心点差、鉛直方向に1 mm程度の中心点差はあるが、長手-直角・水平方向の中心点差は0 mmで、平面図は誤差なく作成できる
×	長手-直角・水平方向の中心点差が1 mm以上で、平面図の作成においては誤差を含むことになる。

が示された。ただし、長手方向に60 mm程度の中心点差が出る場合があるため、位置合わせする付近に曲線部分がないことに留意する必要がある。図-16に、●評価となった位置合わせ結果例を示す。これは、長手方向に80 mm程度の中心点差、鉛直方向に1 mm程度の中心点差を有しているが、長手-直角・水平方向に中心点差はなくフィットしており、平面図は誤差なく作成できる。ただし、長手方向に80 mm程度の中心点差が出るため、位置合わせする付近に曲線部分がないことに留意する必要がある。図-17に、△評価となった位置合わせ結果例を示す。この図のとおり、フィットしてない。しかしながら、長手方向に60 mm程度、鉛直方向に1 mm程度の中心点差があるが、長手-直角・水平方向の中心点差は0 mmであるため、先行研究²⁾と同様に、中心位置をおさえ連結することで、誤差なしでレール位置の平面図を描くことができる。図-18(1)から図-18(2)に、×評価となった位置合わせ結果例を示す。この図でも分かるとおり、モデル点群とデータ点群はフィットしておらず、中心点差も有しており、正確なレール位置ならびに平面図を得ることはできない。



図-18(2) 位置合わせ結果 (×評価例：鉛直方向90° 回転)

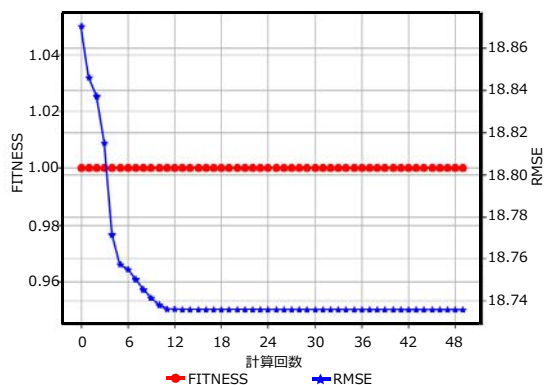


図-19 繰り返し計算過程



図-20 位置合わせ結果（並進移動：1点/16cm²）



図-21 位置合わせ結果（画面の向きは図-20と同じ）

図-19に、繰り返し計算過程におけるデータ点群に対するモデル点群の対応度（FITNESS）と対応点の誤差（ここでは二乗平均平方根誤差（RMSE）で表す）の変化を示した。これは、モデル点群密度が1点/cm²、データ点群初期値が長手方向に90°回転したデータ間での計算結果である。なお、この位置合わせ結果の評価は×である。いずれの結果もこの図のように、FITNESSは計算初期に1.00（対応点が全て見つかった）で、概ね10回以内にRMSEが収束し、類似した初期勾配であった。

(1) 並進移動した（並進ずれの）初期値に対する位置合わせ結果

表-3のとおり、鉛直方向、そして長手-直角・水平方向に並進移動した位置にあるデータ点群は、1点/16 cm²（4 cm四方に1点相当）の点群密度以上ならば水平誤差なしで位置合わせできることが示された。これは、即ち平面図にレール位置を誤差なしで描画できることを表す。図-20に、1点/16 cm²（4 cm四方に1点相当）の点群密度の位置合わせ結果を示す。これに示すように、フィットはしていないが、中心点差は鉛直方向にのみ1 mmあった。この場合ならば、先行研究と同様に、複数個所で位置合わせしたデータ点群の中心点を連結することにより、平面図ならば、誤差なくレールを描画できる。この鉛直方向1 mmの中心点差の特性は点群密度1点/9 cm²でも見られた。これらの原因は、本質的には点群密度の粗密に起因すると考えるが、レールの形状的に鉛直面に向いた点群（頭部側面や腹部）の方が水平面に向いた点群（頭頂部や底部）より多く、水平方向は平均的にフィットしやすい

いため、鉛直方向はそれよりか位置ずれが起こりやすいのではないかと推察した。図-21に、大きな位置ずれ（長手-直角・水平方向6 mm、長手方向34 mm、鉛直方向3 mm）で評価が×であった1点/25 cm²の位置合わせの可視結果を示す。これは、点群密度が低いいためレール面を形成できず位置合わせができなかったものと推察する。

(2) 回転移動した（回転ずれの）初期値に対する位置合わせ結果

点群密度が1点/4 cm²以上なら、長手-直角・水平方向と鉛直方向を軸に回転する場合は90°まで、長手方向の回転ならば45°までならば誤差なく位置合わせが可能なが示された。また点群密度が1点/16 cm²で、どの方向での回転でも45°以内ならば平面図が誤差なく作成可能であることが示された。これらは、すなわち現実的なカントや縦断勾配ならば、この条件を満たすものと考えられる。また、回転軸が鉛直方向、長手-直角・水平方向、長手方向の順で、高い精度で位置合わせを可能とする回転量の範囲が広いことがわかった。鉛直方向に対する回転移動が、総合的に位置合わせ精度が高かったのは、鉛直方向軸がレールの線対称の対称軸であるためと考えられる。長手-直角・水平方向と長手方向に対する回転移動で、高い精度で位置合わせができる回転幅が狭かった要因は、図-18(1)に示す通り、レール形状の類似性（腹部と底部の形状の類似など）のため、大域最小解ではない局所最小解で収束してしまうことが示された。鉛直方向に対する回転移動で誤差が出るのは図-18(2)のように向きは合っているが、点群密度の低さで適切な対応点が得られなかったことが要因として考えられた。また、この位置合わせ誤差が与える影響を考えると、長手方向軸に対する回転移動についてはレールのカントや傾斜敷設との関わりが挙げられる。そのため、カントや傾斜敷設で微小に傾いたレールでも、1点/25 cm²以下の点群密度では誤差が出る可能性がある。また、長手-直角・水平方向軸に対する回転移動結果は縦断勾配と関わる。ただし、現実的な縦断勾配との関わりを明らかにするには45°間隔はレンジが広すぎるため、狭い角度のレンジでの再検討が今後の課題として挙げられた。

(3) 総合考察

表-3に示す通り、現地で観測したレール点群（モデル点群）とそれに合わせるデータ点群の相対位置と点群密度に応じた位置合わせ特性を明らかにすることができた。しかしながら、今回の結果は、現地で計測した点群データを使用しておらず、シミュレートデータで実験したため、あくまでも理論上の結果となる。よって、レールの欠測状況によっては、この結果がそのまま当てはまらない可能性は否めない。よって、今後の課題であるが、欠

測部分があったとしても、求めるレール位置精度の仕様に
 応じて、最低必要な点群密度の基準は明らかにできた
 ものとする。また、直線部分を対象とした実験になっ
 ているが、データ点群は曲率を考慮した長さになっている
 こともあり、極端な曲線でない限り、曲線部分でも同様
 の結果が得られるものと考えている。今回の実験では、
 ICPによるレールの位置合わせの頑健性を調べる目的も
 あったため、現実的には起き得ない回転角の条件も含め
 て実験した。もちろん、この結果は、初期値の決定にお
 いて、見当づけやそのレンジを狭める基礎資料になりう
 るが、現実的なカントや傾斜敷設による傾きへの応答を
 明らかにするためには、微小な回転角での実験が必要で
 ある。今回は、並進移動してかつ回転移動したデータ点
 群では実験しなかったが、並進移動は、一定の点群密度
 以上ならば、どのような移動量でも位置合わせはでき
 るので、結局は回転移動のみ留意すればいいものとする。
 また、2方向以上で回転移動した、即ち“ねじれ”の位
 置の状態での位置合わせについても今回の解析では取り
 扱っていないため、今後の課題である。しかしながら、
 通常、レーザスキャナにはコンペンセータが付いており、
 また、カントや傾斜敷設による傾きや縦断勾配の現実
 的な程度を考えると、ねじれの位置にあるモデル点群と
 データ点群を合わせるようなケースは少ないものとする。

4. まとめ

本研究では、ICPによるレール点群の位置合わせでの
 初期値特性を明らかにすることを目的とした。本研究で

得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 並進ずれの初期値からは、ずれ量に関係なく、点群密度が2 cm四方に1点以上ならば、誤差なく位置合わせができる。
- 2) また、点群密度が4 cm四方に1点以上ならば、平面図でのレール位置を誤差なく描ける。
- 3) 回転ずれの初期値からは、現実的なカントや縦断勾配ならば、点群密度が2 cm四方に1点以上で誤差なく位置合わせができる。
- 4) また、点群密度が4 cm四方に1点以上で平面図でのレール位置を誤差なく位置合わせができる。
- 5) 今回の結果は、点群の位置誤差および濃淡の違いがない前提のため、今後、これらの影響について検証する。

参考文献

- 1) A Soni, S Robson, B Gleeson : Extracting Rail Track Geometry from Static Terrestrial Laser Scans for Monitoring Purposes, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp.553-557, 2014.
- 2) 新名 恭仁, 桶谷 栄一, 横内 広高, 本間 亮平, 辻 求, 近藤 健一 : MMS による鉄道設備のモニタリング, 写真測量とリモートセンシング, Vol.5, No.2, pp.95-99, 2016.
- 3) Paul J. Besl and Neil D. McKay : A Method for Registration of 3D Shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, DOI:10.1117/12.57955, pp.123-140, 1992.
- 4) 増田 健 : ICP アルゴリズム, 情報処理学会研究報告, pp.1-8, 2009.
- 5) Qian-Yi Zhou and Jaesik Park and Vladlen Koltun : Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing, *arXiv:1801.09847*, 2018.

(2020.4.3 受付)

THE CHARACTERISTICS OF REGISTRATION OF RAIL POINT CLOUDS FOR POSITIONAL INITIAL VALUES USING THE ICP ALGORITHM

Kosho MATSUSHITA, Yoshinori FURUI, Ryuji GOTO, Yoshiyuki YAMAMOTO,
 Gou NAKAMURA and Eiji NAKAMURA

The purpose of this research was to clearly show the characteristics of registration of rail point clouds for positional initial values using the iterative closest point (ICP) algorithm. The point clouds are made from the 3D CAD model of the 50 kgN rail using a meshed method on CloudCompare, which is an open source for point cloud processing. In the description of the algorithm, a “data” shape is moved (registered and positioned) to be in best alignment with a “model” shape. The point clouds as the model shape were 500 mm long with five different densities ranging from 1 point per 1 cm² to 1 point per 25 cm². The point cloud as the data shape was 100 mm long with a density of 1 point per 1 mm². Thereafter, the point clouds as the data shape are translated and rotated from the original data shape. The process of rotation and translation are executed with reference to a rectangular coordinate system on the origin, which is the central point of the bounding box of the point cloud. The results were as follows: 1) The translated point clouds with density greater than 1 point per 4 cm² can be completely registered. 2) Moreover, the top view can be created accurately from the translated point clouds with density greater than 1 point per 16 cm². 3) The rotated point clouds with density more than 1 point per 4 cm² in the actual railway situation can be registered without error. 4) Moreover, the top view can be created accurately from the rotated point clouds with a density greater than 1 point per 16 cm² in the actual railway situation.