



Title	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計測に関する研究
Author(s)	山本, 耕平
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/76564
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

2台のレール直上レーザスキャナを用いた
鉄道建築限界計測に関する研究

山本 耕平

2020年1月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景と目的.....	1
1.1.1 鉄道建築限界管理の現状	1
1.1.2 鉄道建築限界計測の現状と課題	2
1.1.3 鉄道施設調査の現状と課題	3
1.1.4 効率的で費用対効果が高い調査手法の必要性	4
1.1.5 研究の目的	4
1.2 論文の構成.....	5
第2章 既往の研究.....	7
2.1 レーザ計測を用いたレール位置取得の研究	7
2.2 鉄道建築限界の3次元計測に関する研究	8
2.3 センサキャリブレーションに関する研究	9
2.4 鉄道施設の3次元計測に関する研究	10
2.5 本研究の新規性	11
2.5.1 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システムの開発	11
2.5.2 2台のレール直上レーザスキャナのセンサキャリブレーション手法の開発	12
2.5.3 分岐器トングレール変状把握手法の検証	12
第3章 2台のレール直上レーザスキャナを用いた 鉄道建築限界計測システム.....	13
3.1 本章の概要	13
3.2 提案手法	14
3.2.1 2台のMMSユニットによるレール直上レーザスキャナ計測	14
3.2.2 走査線単位にレール位置抽出	15
3.2.3 軌間中心位置の抽出	16
3.2.4 2台のMMSユニットの点群データの整合	17
3.2.5 鉄道建築限界3次元モデルの生成	17
3.3 実験方法	20
3.3.1 対象の線路	20
3.3.2 基準となる計測	21
3.3.3 点群データの移動取得に使用したMMSと計測諸元	22
3.3.4 軌間中心位置の計算	23
3.3.5 鉄道建築限界3次元モデルの作成と支障判定	23
3.4 実験結果と考察	25
3.4.1 MMSで移動取得した点群データ	25
3.4.2 軌間の比較	26

3.4.3 2台のMMSユニットの点群データの整合	27
3.4.4 鉄道建築限界3次元モデルの作成	28
3.4.5 鉄道建築限界の支障判定	30
3.5 まとめ	33
第4章 2台のレール直上レーザスキャナのキャリブレーション手法	35
4.1 本章の概要	35
4.2 レーベンバーグ・マルカート法による外部標定要素計算手法	37
4.2.1 初期値によるレーザ点群座標と平面との平均距離の作成	37
4.2.2 平面条件による外部標定要素の算出	39
4.2.3 外部標定要素で生成した点群と平面との平均距離の評価	42
4.2.4 評価関数によるLM法の係数の更新	42
4.3 キャリブレーションボードと平面を用いた実験	44
4.3.1 点群データ取得	44
4.3.2 データ解析処理	45
4.3.3 提案手法でのキャリブレーション	46
4.3.4 キャリブレーション結果の確認	47
4.4 実験結果と考察	48
4.5 まとめ	51
第5章 2台のレール直上レーザスキャナによる分岐器トングレールの変状把握の検証	53
5.1 本章の概要	53
5.2 2台のレール直上レーザスキャナの分岐器の変状把握手法	55
5.2.1 2台のMMSユニットの点群データを整合する手法	56
5.2.2 トングレール形状の3次元復元表示	56
5.3 実験と評価	57
5.3.1 実験に使用するデータ	57
5.3.2 トングレールのレーザ点群データの定性的比較	59
5.3.3 トングレールの高さの比較	61
5.3.4 基本レールからトングレールへの比高の比較	62
5.3.5 横圧による変状の把握	64
5.4 まとめ	65
第6章 結論	67
6.1 本論文のまとめ	67
6.2 今後の課題	69
参考文献 71	
謝辞 75	

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

1.1.1 鉄道建築限界管理の現状

鉄道事業者は国土交通省の省令による技術基準¹⁾を維持するため、実施基準と維持管理計画を作成し、点検業務を実施している。鉄道建築限界は同技術基準において、安全性にかかる基準²⁾である。鉄道建築限界の概念は、線路上を走行する車両に対して、安全な一定空間を確保させ、建造物を含むその他全ての施設が車両に接触しないように線路に沿って作られる「施設のいかなる部分も侵すことの許されない限界」³⁾と定義されている。

鉄道建築限界は鉄道事業者により適時点検、確認されているが、鉄道建築限界との空間関係の把握不足が原因で、支障事故が起きた事例⁴⁾がある。図- 1.1 にその概要図を示す。この事例では、線路の上部にある仮設工事の足場板が鉄道建築限界の内側にあることを把握できず、曲線区間で車両と接触し、重大な事故となった。鉄道建築限界は、直線区間と曲線区間で幅が違い、傾斜もあり、それゆえ、建築限界を確認するために、施設と 2 本のレールの位置関係を空間的に正確に把握することが必要である。

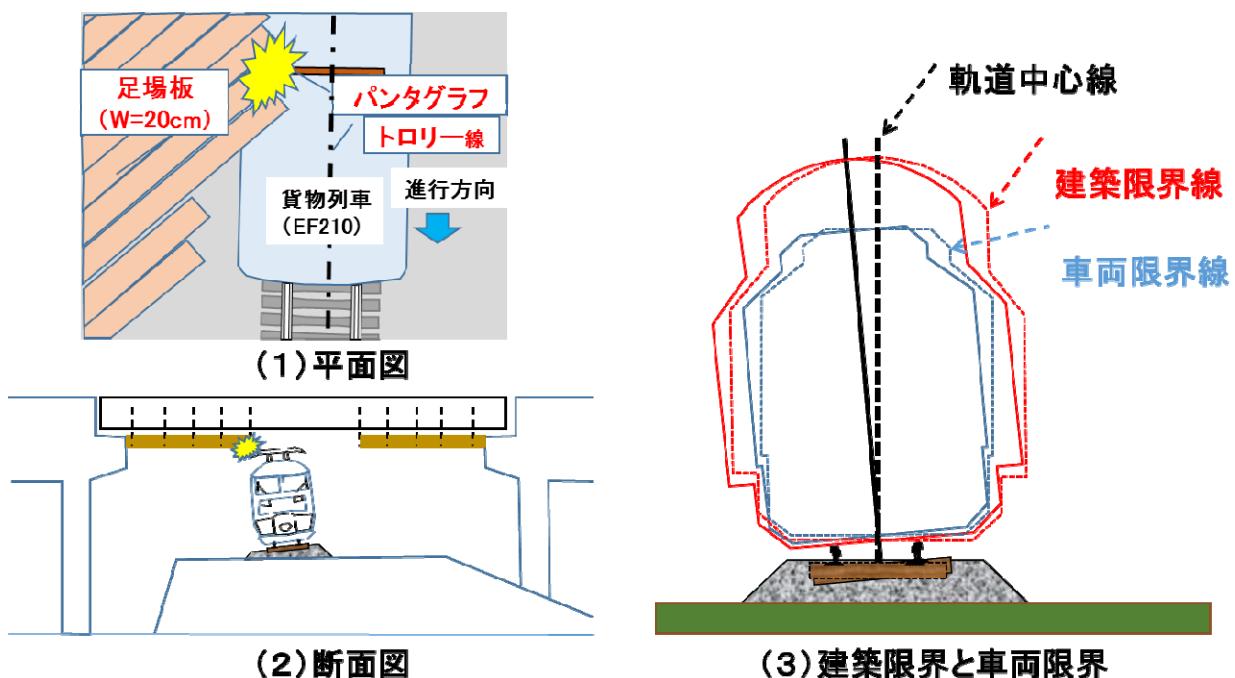


図- 1.1 仮設の足場材が鉄道建築限界に支障し、パンタグラフに接触した事例 (2016.5)

1.1.2 鉄道建築限界計測の現状と課題

鉄道建築限界計測では、2本のレール頭部の内側の中点である軌間中心位置、レール面（頭頂面）の高さ、支障物の位置が必要な情報となる。さらに、曲線では拡大建築限界のため、円曲線の直径、通過曲線の始終点の位置情報が必要である。

そのため、鉄道事業者は、車体に寸法定規やセンサ（触手や距離計）を装備した検測車両を走行させ、支障可能性がある位置（線路起点からの距離：キロ程）を記録し、保線要員が、定規（標準ゲージ）にレーザ距離計を組み合わせた装置やトータルステーション（以降、TS）による計測により鉄道建築限界計測を行っている。まず、標準ゲージとレーザ距離計の組み合わせは、0.002m~0.003mの精度で計測が可能である。しかし、機器の設置状況や視準器の有無により、軌間中心位置や、支障物の位置に人的要因による誤差を生じる可能性がある。次に、TS計測は、離れた位置から軌間中心位置、レール面の支障物の位置を3次元座標で、0.002mと高精度に取得可能である。しかし、複数の線路が交差する構内、複線の曲線区間、橋梁部、トンネルなど、線路の状況によっては、TSの設置に制限がある。また、いずれの方法も、線路内に立ち入った作業であり、安全性の確保が大きな課題である。

こうした課題を解決するため、近年、1台のレーザスキャナをMMS (Mobile Mapping System)あるいは手押し車に搭載して、線路を計測することが行われている。ここで、レーザスキャナはレーザを連続して照射し、対象物に反射して戻ってくる時間または位相差と照射角度から、地形や構造物の形状を広い範囲で面的に計測できる装置とする。また、MMSは車両などにデジタルイメージセンサや、レーザスキャナ装置を装備し、GNSS (Global Navigation Satellite System) やIMU (Inertial Measurement Unit)などの他のセンサ情報を用いて、点群データを3次元復元し、地図座標に変換出力されるシステムである。更に、MMSユニットは、車両に収められたMMSセンサシステム機器を指すものとする。センサシステムにおいて、レーザスキャナは、受発光部が回転し点群データが線上に整列する（以下、走査線と称す）が、レーザ発射点が2本のレール中央の上部に位置しているため、レーザ光は線路に斜めにあたり、点群データは片面しか取得できていない。**図-1.2**にレール軌間中央上部からレールへ照射した走査線1本分の点群データを示す。

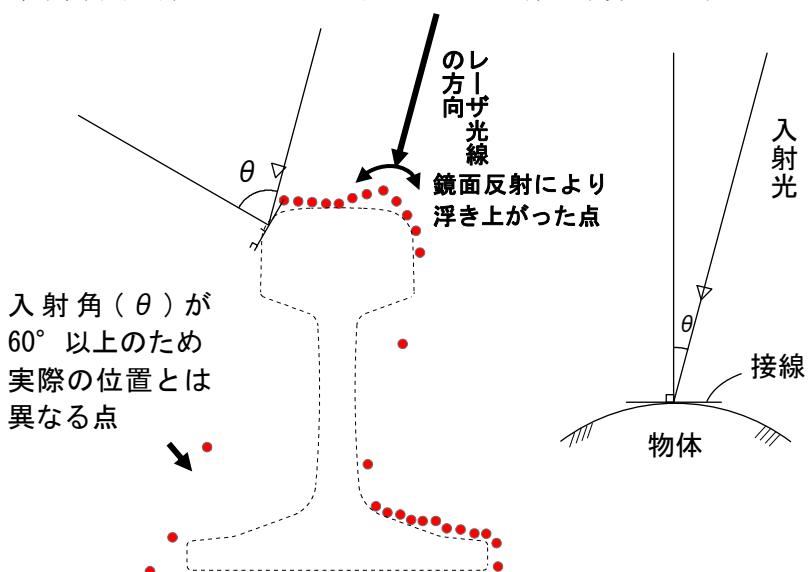


図-1.2 レール軌間中央上部からレールへ照射した走査線1本分の点群データ

レールの頭部においては、車輪とレールが接触する部分においては鏡面反射が起り、さらに、レーザ光の入射角が 60° を超える場合は、実際とは違う位置に点群データが取得される⁵⁾。こうした状況から、実際とは違う位置の点群データをノイズとして除去すると、点群データが不足し、レール頭頂部の高さ位置を正確に計測できないことが多い。その弱点を補うため、縦断方向に厚みを取り、走査線が重なり合った状態でモデルをあてはめ、補完して位置を特定する方法が一般的に用いられている。しかしMMSの計測速度が上れば、縦断方向の間隔が広がり、1m以上の幅を束ねて評価しなければならず、実際の解析すべきキロ程の位置とかい離が生じる可能性がある。

なお、仮に1台のレーザスキャナを搭載するMMSを往復させ、点群データを重ね合わせる方法を取ったとすると、計測に2倍の時間がかかるだけでなく、時間差のためGNSSの精度が異なり、正確に計測することが困難だと考えられる。2台のレーザスキャナを搭載するMMSユニットを搭載しても、レーザスキャナの配置を変えられないか、変えた場合は、キャリブレーションを実施するために、別途作業時間と費用が必要となる。

さらに、計測された点群データが鉄道建築限界の内部にあるかどうかを確認する手法に、1mの縦断方向の幅ごとに広げた断面が用いられているが、この方法では、曲線部で拡大建築限界を正確に評価することができず、0.02~0.03m程度の違いが発生する場合がある。

1.1.3 鉄道施設調査の現状と課題

国・公共機関のインフラ管理者は計画的で戦略的な維持管理更新のモニタリングシステム化を推進している。そのような中、鉄道事業者は、全体の7割が経常収支では赤字となっており⁶⁾、維持管理の予算確保が困難な状況にある。大都市圏において高速・高密度な路線を保有する鉄道事業者は、高度な調査技術を適用し、維持管理レベルを高い水準に保つための維持管理業務が実施されている。例えば、総合軌道検測車両などに莫大な予算を投じて開発、運用を行い、データベースによる解析に基づいた補修計画を立案し、保線管理のシステム化を推進している⁷⁾。しかし、計画的な設備の補修中に事故が生じる場合があり、営業車両にセンサを装着し高頻度な調査を指向している⁸⁾。

一方、それ以外の鉄道事業者は、高度な調査技術を保有することは、予算の制約上困難であり、実際は、保線作業において巡視・定期点検時の目視調査に頼る現状である。安全な運行のため、線路の巡視点検は高い頻度で行われている。軌道の最大の弱点といわれるレール継ぎ目と分岐器は特に注意を払う対象となっている。

分岐器は、車両を線路から別の線路に移すため、枕木に固定されない、細い特殊なレール（トンネルレール）を使用している。日本に鉄道が導入され初めての鉄道事故が分岐器の故障であったが⁹⁾、改良が積み重ねられた現代においても、故障が皆無となることはない¹⁰⁾。分岐器の故障は、重大な運行障害につながるため、予防保守として、通過した車両重量の累積（通過トン数）が管理され、定期的に交換を行うのが通常である。

事故防止のため、巡視点検では、トンネルレールの先端と基本レールの相対的な位置関係（軌道変位）や密着の具合が点検されているが、人手による計測作業で差異を記録するため、検査結果が個人差を伴い、誤差を含む可能性がある。さらに、作業者が線路に立ち入って作業する必要があるため、昼間の列車間合いの時間で作業ができない場合は、検査対象箇所の線路を閉鎖する必

要がある。現状の検査方法は、運行スケジュールへの影響がある上、作業そのものが事故につながるリスクを伴う。

1.1.4 効率的で費用対効果が高い調査手法の必要性

大都市圏以外の鉄道事業者は、鉄道建築限界や、鉄道施設の維持管理のための点検業務について、安全性や運行への影響を考慮すると、高価な専用計測車両を用いず、線路内を効率的に移動しながら点検・調査を行う手法の開発が必要である。MMS を車両ごとトロッコなどに搭載して、牽引するだけでは、レーザ点群の密度が不足し、対象の施設を詳細に把握することができない。仮に、複数台の MMS を搭載したトロッコをモーターカーなどでけん引して計測する場合、独立したデータの整合を行うため、相当な計測データ処理の時間がかかる。そのため、延長が伸びれば、工期や調査費用が増加することとなる。現実的には、作業の安全性リスクを許容せざるを得ない状況下で、従来の非効率な人手による調査手法が選択される傾向が生じると考えられる。従って、効率的かつ費用対効果が高い調査手法が必要とされる。

1.1.5 研究の目的

本研究では、高い安全性が要求される鉄道事業は、線路と施設の維持管理によって実現されている状況に着目し、鉄道空間を安全で効率的に把握する手法を提案するとともに、鉄道建築限界 3 次元モデルを利用するためのツールを開発し、維持管理業務を支援することを目的として研究に取り組む。そのために、線路を移動しながら鉄道施設の空間情報を取得し、安全基準を満たす精度で、鉄道建築限界と鉄道施設の位置関係や、鉄道施設の変状を把握する調査手法を開発する。

はじめに、既往の研究を通じて現状の課題を整理する。次に、レールを高精度に計測する計測システムを開発し、さらに鉄道建築限界モデルと鉄道施設の位置関係を高精度に把握するシステムを開発する。計測システムの効率性や費用対効果を改善するために、センサシステムのキャリブレーション手法を開発する。また、レールを高精度に計測可能であることから、分岐器におけるトングレールの変状把握について検証する。これらの結果を通して、線路と施設の維持管理業務の効率性向上への寄与を示すことが本研究の目的である。

1.2 論文の構成

本論文は、全6章で構成する。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、鉄道事業者の鉄道建築限界管理の現状と課題を踏まえ、3次元計測技術を利用した線路における鉄道建築限界の調査手法を整理し、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。既往の研究は、レーザ計測を用いたレール位置取得の研究、鉄道建築限界の研究、鉄道施設の3次元計測に関する研究とセンサキャリブレーションについての研究を整理した。それらを踏まえて、既往の研究に対する本研究の新規性を述べる。

第3章では、本研究にて開発した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計測システムについて述べる。

第4章では、開発したシステムを用いてレールの変状について把握可能か検証するために、分歧器のトングレールの計測について述べる。

第5章では、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計測のデータ処理の効率を上げるために開発したキャリブレーション手法について述べる。

第6章では、結論を述べる。

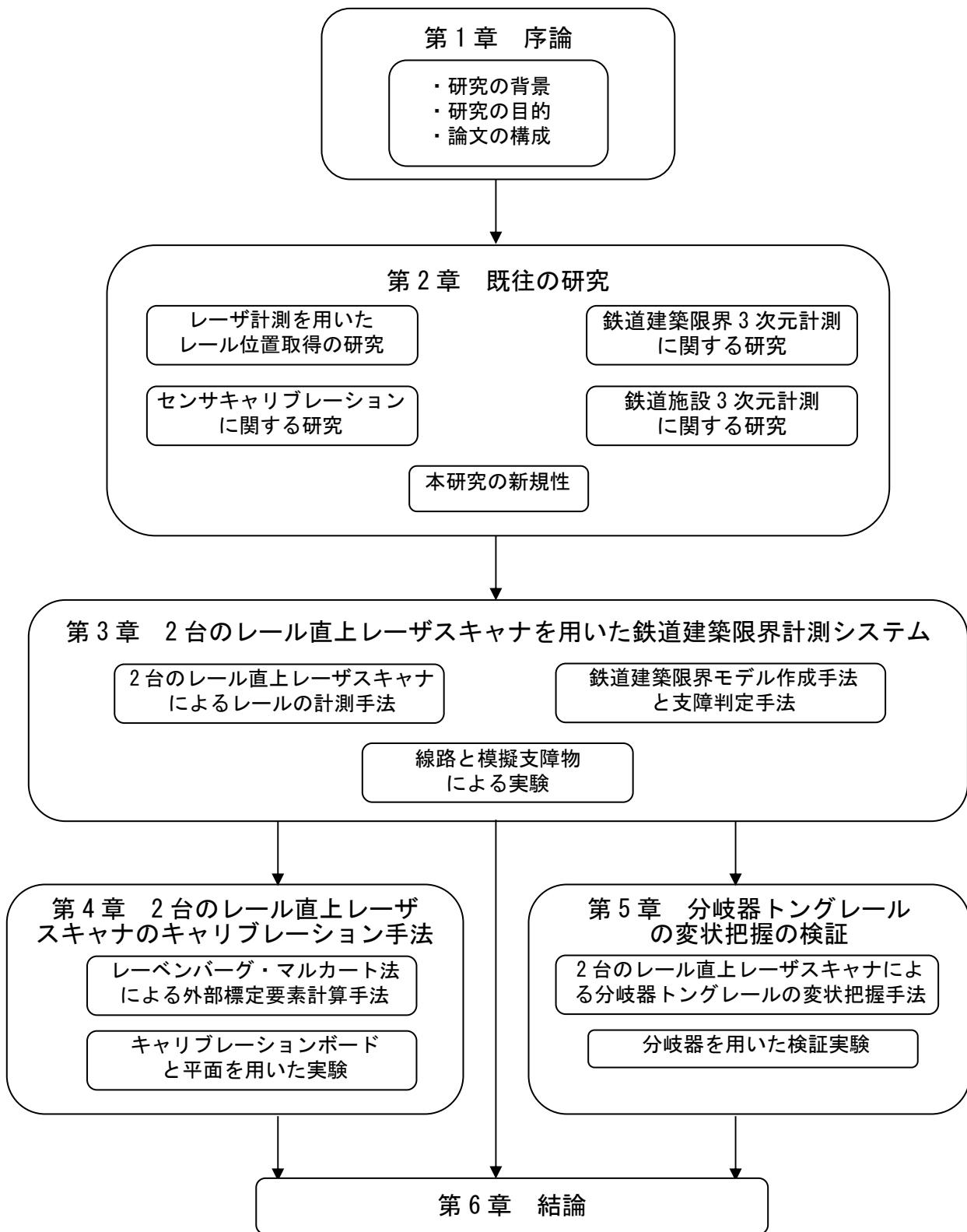


図- 1.3 本論文の構成

第2章 既往の研究

2.1 レーザ計測を用いたレール位置取得の研究

近年、レーザ計測した点群データを用いたレールの位置抽出の研究が盛んに行われている。Neuvert ら¹¹⁾は、回転翼で高度 170m を飛行し取得した高精細な航空レーザデータを使用して、RANSAC (RANdom Sample Consensus) 法で直線、曲線、平行線を評価し、DTM (Digital Terrain Model) との高さの差分を比較し、レールを抽出し、電線、電柱などは、知識ベースで分類した。しかし、レールの位置の評価までは行っていない。

Soni ら¹²⁾は、地上型レーザスキャナ (TLS; Terrestrial Laser Scanner) で取得したレール表面付近の点群データを主成分分析し、局所平面について最小二乗法でノイズデータを評価した。TLS の点群データは、多方向からレーザが照射され、取得した点群データがレール形状を全体的に表しているため、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム¹³⁾ を用いて 1.5~3mm の残差でレール形状モデルの位置を合わせることに成功した。しかし、TLS 計測は有効な計測範囲が 50m 程度で、線路延長に対して費用を下げることが困難である。

欧州では、EC (European Committee)¹⁴⁾ が、レーザスキャナ装置を営業用車両に搭載して鉄道建築限界を計測する方法を検討し、技術仕様書に提示している。ただし、高密度スキャナでも、縦断方向の解像度が 0.25m となるため、費用対効果を検討の上、トロッコに付けたレーザ計測装置の併用による補完の必要性が示されている。

MMS で取得した点群データを評価する研究も盛んである。Arastounia¹⁵⁾, Benito¹⁶⁾, Elberink ら¹⁷⁾, Arastounia ら^{18), 19)}および Pastucha²⁰⁾ の研究に共通することは、MMS 点群を統計的な手法で評価し、点群データをブロック単位で切り分けてモデルデータを自動的にあてはめ、レールの位置を求めることがある。具体的には、この点群データを線路の長手方向に 1m 程度の長さのレールモデルが最もあてはまる位置を連続的に求める。従って、配置したモデルのブロックを並べた後に、連続性を保つために位置が調整され、計測すべきキロ程位置での数値は調整計算後の残差を含む可能性がある。

一方、点群の解像度向上のため、高密度スキャナを搭載した鉄道計測システム構築の研究・開発が盛んである。Mikrut ら²¹⁾は 2 種類の MMS の点群データの精度を評価し、鉄道建築限界への適用性を検証した。この手法では断面に厚みを持った点群データを 3 次元 CAD で読み取ったが、軌間中心位置で 0.02~0.03m の精度となっており、詳細な手法については述べられていない。また、Stein²²⁾は、レーザ計測によるノイズの特性を積極的に利用し、線路や分岐器を構成するレールの自動的な抽出を試みるため、車両限界の上限の高さにレーザスキャナを設置し、レール線形を取得する実験で断面の X 軸、Z 軸方向に 0.01m 以下の精度でレールの位置を取得した。

2.2 鉄道建築限界の3次元計測に関する研究

Zhou ら²³⁾は、トンネルにおける鉄道建築限界について、奥行きがある断面領域に、極座標を使用して支障物を把握する手法を提案している。レール頭部表面付近の点群を抽出し、レール頭部の両縁あたりを限定し、最小二乗法で軌間中心線と、中心点を求め極座標の中心とする。しかし、レーザ照射方向による反射強度に起因する誤差があるとしている。

日本国内では、高密度のレーザを搭載したMMSを用いた鉄道建築限界に関する研究が盛んである。新名ら^{24), 25)}は、MMSを搭載したトロッコや自動車を電動モーターカーに搭載し、取得した3次元点群データをブロック毎にICPアルゴリズムを用いて、軌間側のレール頭部の角の位置(ゲージコーナ)を抽出した。これらを用いて、ブロック単位での鉄道建築限界モデルを作成し、RANSAC法に領域成長法を合わせて用いることでカテナリー線や電力線を分類し、支障判定対象から除外する方法を提案した。

これら2つの研究では、MMSをレールの真上に設置していない。さらに、建築限界断面を縦断方向に厚みを持たせた3次元モデル作成し、建築限界の支障状況を検出できるか評価している。この方法では、3次元点群データを断面投影して支障判定を行うため、拡大建築限界箇所では、断面を細分化しなければならず、実用上の課題となる可能性がある。

さらに、遠藤ら²⁶⁾はTLSとレーザ距離計を装備し、正確に横断面を追隨する倣い装置をに加え、3軸ジャイロを搭載し専用トロッコを開発した。測定精度は開発時のヒアリング調査をもとに±5mmと設定された。このトロッコを自動追尾型のTSで連続して位置座標を取得し、0.007mの精度を実現している。自動測定したカントから鉄道建築限界の拡大量を求め、駅プラットフォームとの位置関係で検証を行った。しかし、トロッコでの移動スピードや、TSによる連続計測が必要であることから、安全性や、実計測距離が課題といえる。これらの研究は、いずれの場合も、レール中央から照射した点群データであり、レールの真上に設置したレーザスキャナでレール全体を捉えたシステムの研究は見当たらない。

また、小林ら²⁷⁾は、鉄道線路線形の設計支援システムの中で、設計値に基づく鉄道建築限界を3次元モデルで生成し、鉄道施設3次元モデルとの干渉性を確認する手法を提案した。しかし、このシステムは、現況を計測した3次元点群データを用いて、設計したレールの位置を合わせこむ手法には言及されていない。そのため、実際のレール位置を用いた鉄道建築限界にはなっていない。

現況のレール位置に沿って鉄道建築限界3次元モデルを作成するためには、レール全体をとらえることができるよう2台のレーザスキャナをレールの真上に配置し、走査線単位で鏡面反射による誤差に対応したレール位置を求め、鉄道建築限界の拡大と適減に対応するシステムを研究する必要がある。

2.3 センサキャリブレーションに関する研究

一般的なMMS製品のセンサキャリブレーションは、メーカの調整ソフトウェアや市販のレーザ点群ソフトウェア^{28) 26)}と3次元CADを組み合わせて、地物を抽出し、既知点や共通する線分を用いて調整値を求める。MMS製品は、センサなどのシステム構成を変えずに、出荷時に測定された外部標定要素を用いて、データ処理をすることが前提である。そのため、高精度なGNSS/IMUを備えた機器の計測精度は、0.02m~0.03mの範囲に保証されている。Riegerら²⁹⁾は、都市部において、TLSをMMSに搭載し、メーカの調整ソフトでキャリブレーションを行った。建物の切妻面に対する角度を変え、キャリブレーションに最適な面とレーザスキャナの相対角度で取得し、0.015m以内の精度を実現している。しかし、本研究で使用するシステムは、個別に稼動させる2台のMMSを線路の位置に合わせて計測するため、システム構成はメーカの想定仕様外であるため、整合させる手法が無い。そのため、新たなキャリブレーション手法の開発が必要である。さらに、鉄道3次元計測に求められる精度は0.01m以内と厳しく、作業の時間的な制約があるため、高精度かつ効率的なキャリブレーション手法が必要である。

MMS のセンサキャリブレーションを高精度に行うために、より高精度な計測手法で取得したレーザ点群を参照してキャリブレーションを行う手法が研究されている。Hong ら³⁰⁾は、TLS で取得したレーザ点群データから平面を RANSAC 法で抽出し、同様に MMS のレーザスキャナのレーザ点群から抽出した平面を比較し、最小二乗法で外部標定要素を求めた。25 点ずつ 10 面抽出した結果、センサ位置が 0.01m 以内で 3 軸の傾きが 0.1° 以内の精度を得ることができるとした。一般的な MMS キャリブレーションには効率的で有効であるが、地上レーザより 2~10 倍程度高精度に計測可能な TS を使用して基準となる平面を計測することができる。

また、写真測量³¹⁾の調整計算では、共面条件を用いて相互標定し、最小二乗法をあてはめ標定要素の解を求めるが、さらに効率的に計算する手法として、非線形の最小二乗法が研究されている。織田³²⁾は 5 点法での解法として非線形最小二乗法を利用する手法を提案している。非線形最小二乗法として、LM (Levenberg-Marquardt: レーベンバーグ・マルカート) 法と Gauss-Newton 法を比較している。LM 法は比較的に、正しい値に収束する割合が高い結果となった。また、コンピュータビジョンにおいても、LM 法が標準的に利用されている³³⁾。コンピュータビジョンでは、自動処理を前提としているため、安定して解を求めることが重要である。

コンピュータビジョンの一部であるロボットビジョン分野の研究でも LM 法を適用して、センサキャリブレーションが行われている。Zhang ら³⁴⁾は、ロボットが幾何的な情報を認識するためには、センサ相互の外部標定要素値が重要であるとした。カメラのチェックカードを平面条件として、レーザ点群の位置との残差を計算するために、非線形最小二乗法として LM 法を適用した。現場測定点が無い状態でもカメラの平面とレーザ点群の平面の残差は 0.02~0.03m となっている。複数のセンサ相互でのキャリブレーション精度を高めることで、ロボットビジョンにおける幾何情報の認識精度が高まることが示されている。

レーザスキャナのキャリブレーション手法は、平面の評価が重要となる。また、写真測量では効率的に未知量をもとめる計算手法が適用されている。

2.4 鉄道施設の3次元計測に関する研究

Asschelman³⁵⁾は、ボクセルベースのセグメンテーションアルゴリズムとグラウンドメッシュを使用した再構成を採用した。この方法により、鉄道環境での点群の識別性を改善できる。セグメンテーション後、ポイントクラウドのレール部分を抽出し、レールビームモデルを適用して、レールゲージとカントを測定した。さらに、鉄道の柱線と架線に適用されていた。著者はまた、この方法のアルゴリズムによる計算コストの削減を主張した。

Yang ら³⁶⁾は、幾何学情報と放射分析情報の組み合わせを利用して、MLS (Mobile Laser Scanner) データから線路位置を抽出した。著者らは、データ駆動型アプローチで約 95% の検出率に達した。一方、データ駆動型のアプローチは、点密度と点群の品質に影響される傾向がある。これらの 2 つの文献に共通した問題は、分岐器の複雑な構造のために、抽出した軌間中心線が正しい位置とは異なるってしまう可能性があることであった。

Heckel³⁷⁾は、レーザスキャナで取得した 3 次元点群データで鉄道インフラストラクチャの施設・設備を検出する方法を提案した。まず、対象物とテンプレートをマッチングはレーザスキャナの 1 回転分のデータに適用した。さらに、レールの位置検出には位相的特徴解析を使用した。さらに、分岐器については、レールの複合的な組み合わせに対しては Support Vector Machine³⁸⁾ を使用する検出方法を提案している。この方法は、2 台のレーザスキャナで得られたデータで評価されていたが、レーザスキャナは 2 台とも軌間中心線上に、上下に並べた取り付けとなっていた。従って、線路全体を捉えておらず、分岐器の詳細な構造を示すレーザ点群の取得はできていない。

Xiong³⁹⁾は、トロリー一台車に GPS (Global Positioning System) を装備した光切断法のライنسキヤナとレーザスキャナシステムを使用して、レール表面の 3D レーザープロファイリングシステムを開発した。検証データは、レール表面の変状の分類については肯定的な結果を示していたが、データ処理速度は改善を要することが示された。ライ ns キヤナは 2 台が左右それぞれのレールをとらえていたが、レーザスキャナは中央に 1 台であり、線路全体をとらえていない。従って、センサのキャリブレーション精度に依存し、各センサデータの統合的なデータ処理の効率性が課題となる。

一方、Pavemetrics 社の LRAIL⁴⁰⁾ は、車両の後方に、2 台の高密度な光切断法による 3 次元イメージライ ns キヤナを左右のレール上に独立して据え付け、レール頭部の表面、蹄鉄装置、マクラギ等を計測するシステムである。しかし、このイメージライ ns キヤナの横断方向の計測幅は下方の 4~6m で、奥行方向の計測深度は 0.25m の範囲内に限定される。そのため、計測対象は、線路に限定され、極座標による解析処理であるため、曲線におけるレールデータも直線で表示されてしまう。

Gabara⁴¹⁾は、高精度に 3 次元復元するために、画像を用いて生成した 3 次元点群測定方法を提案した。その結果、位置座標の精度は 0.001m 未満になった。写真画像は、デジタル SLR (Single Lens Reflex) で撮影し、SfM (Structure from Motion) を用いたソフトウェアで処理し、6.99m² の撮影範囲を 22 分から 327 分までの時間で画像取得およびデータ処理を行った。著者は、線路の検査システムの開発を計画しているが、面的な撮影画像に 3 次元解析処理を施すため、現在の計算処理技術を用いる場合は、実用的な処理時間とはなっていない。

2.5 本研究の新規性

本研究の目的は、線路を移動しながらに鉄道施設の空間情報を取得し、安全基準を満たす精度で、鉄道建築限界と鉄道施設の位置関係や、鉄道施設の変状を把握する調査手法を開発することである。

2.5.1 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システムの開発

本研究では、線路内における鉄道建築限界の支障を把握することを目的として、図-2.1に示すように、工事用軌陸運搬車両（以下、軌陸車）に2台のMMSユニットのレーザスキャナを2本のレールそれぞれの真上に来るよう配置し、レールの頭部と底部をとらえ、線路や施設を3次元計測した点群データを用いて鉄道建築限界を求める手法を提案する⁴²⁾。営業線での利活用を想定し、列車間合いにおける作業時間が限定されるため、MMSのベース車両は踏切などから現地に迅速に移動できる軌陸車とした。また、計測した点群データを直接用いて、鉄道建築限界を求めるためには、鏡面反射による誤差や入射角の影響などによるノイズに対応する必要がある。そのため、レール頭部の点群データの鏡面反射の影響が高さ方向に限定されている計測条件により、点群データからレール位置を直接計算し、レーザスキャナの走査線単位で軌間中心の位置を求め、軌間中心線を用いて2台のMMSユニットの点群データを整合させ、計測された線路線形に沿って鉄道建築限界の3次元モデルを作成する。本研究の手法を試験線路に適用し、直線区間、曲線区間をTLSで計測した点群データと実際に比較し、鉄道建築限界3次元モデルの有用性を検証した。

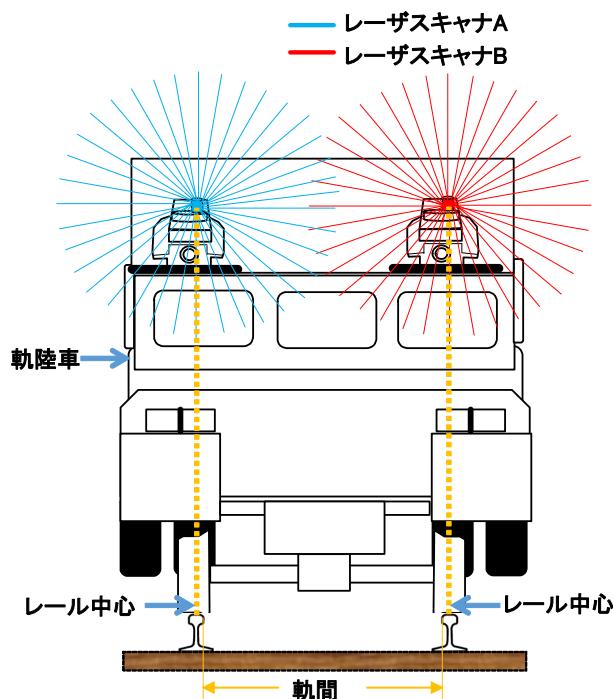


図-2.1 2台のMMSユニットのレーザスキャナの配置図

2.5.2 2台のレール直上レーザスキャナのセンサキャリブレーション手法の開発

2台のレール直上レーザスキャナは、レールの位置の計測結果に基づいて、軌間中心位置を計算し、整合を図る。計測結果を用いることにより、それぞれの計測誤差や計算誤差を含む可能性がある。さらに整合計算処理をするための計算時間がかかるため、計測延長が長くなれば、計算コストは比例して増大する。

そこで、本研究では、2台のMMSユニットを用いる鉄道3次元計測のため、レーザ点群と平面条件を用いて、LM法を適用して外部標定要素を求めるキャリブレーション手法を提案する⁴³⁾。各MMSのレーザスキャナの相互の外部標定要素の精度を向上させることで、2台のMMSユニットのレーザ点群データを整合させる。実験線を走行し、3次元計測したデータを用いて、提案手法について実環境での効果を確認する。

2.5.3 分岐器トングレール変状把握手法の検証

線路中心に設置された1台のレーザスキャナが、線路内側のみの計測範囲であることに比較して、2台のMMSユニットのレール直上レーザスキャナが、線路全体をとらえる計測範囲となることから、レーザ点群を使用したトングレールの変状把握の有効性について検証する⁴⁴⁾。2台のレール直上レーザスキャナを構成したMMS機材は、重要な鉄道設備である線路の分岐器のレールの両面から移動計測することが可能である。また、レール直上のレーザスキャナは、直下レールに対向したレールの側面を照射する。従って、分岐器のトングレールの先端付近の形状が両面から取得可能である。

さらに、MMSユニットを前後に搭載する場合、線路周辺の施設・設備が対面方向と背面方向の両方からレーザ点群を取得し、両面の形状を0.01m以内の誤差で整合することが可能である⁴⁵⁾。よって、TLSを分岐器の両側から計測することに比べ、極短時間で取得作業を行うことが可能なことから、比較検証により、安全性や効率性の向上が示される。

第3章 2台のレール直上レーザスキャナを用いた 鉄道建築限界計測システム

3.1 本章の概要

本章では、線路内における鉄道建築限界の支障を把握することを目的として、前章の図-4に示すように、工事用軌陸運搬車両（以下、軌陸車）に2台のMMSユニットを2本のレールそれぞれの真上に来るよう配置し、レールの頭部と底部をとらえ、線路や施設を3次元計測した点群データを用いて鉄道建築限界を求める手法を提案する。営業線での利活用を想定し、列車間合いにおける作業時間が限定されるため、MMSのベース車両は踏切などから現地に迅速に移動できる軌陸車とした。また、計測した点群データを直接用いて、鉄道建築限界を求めるためには、鏡面反射による誤差や入射角の影響などによるノイズに対応する必要がある。そのため、レール頭部の点群データの鏡面反射の影響が高さ方向に限定されている計測条件により、点群データからレール位置を直接計算し、レーザスキャナの走査線単位で軌間中心の位置を求め、軌間中心線を用いて2台のMMSユニットの点群データを整合させ、計測された線路線形に沿って鉄道建築限界の3次元モデルを作成する。本研究の手法は、レール直上レーザスキャナを軌間の幅に合わせて計測可能である。実験は試験線路で日本の在来線に多く用いられている狭軌のレールに適用し、直線区間、曲線区間をTLSで計測した点群データと実際に比較し、鉄道建築限界3次元モデルの有用性を検証した。

3.2 提案手法

本研究では、レール直上に設置した2台のMMSユニットのレーザスキャナの点群データから軌間中心線をそれぞれ求め、求めた軌間中心線を合成することで、2台のMMSユニットの点群データを整合する手法と、軌間中心線から鉄道建築限界の3次元モデルの生成を行う手法を提案する。図-3.1に提案手法のフローを示し以下の項で詳述する。

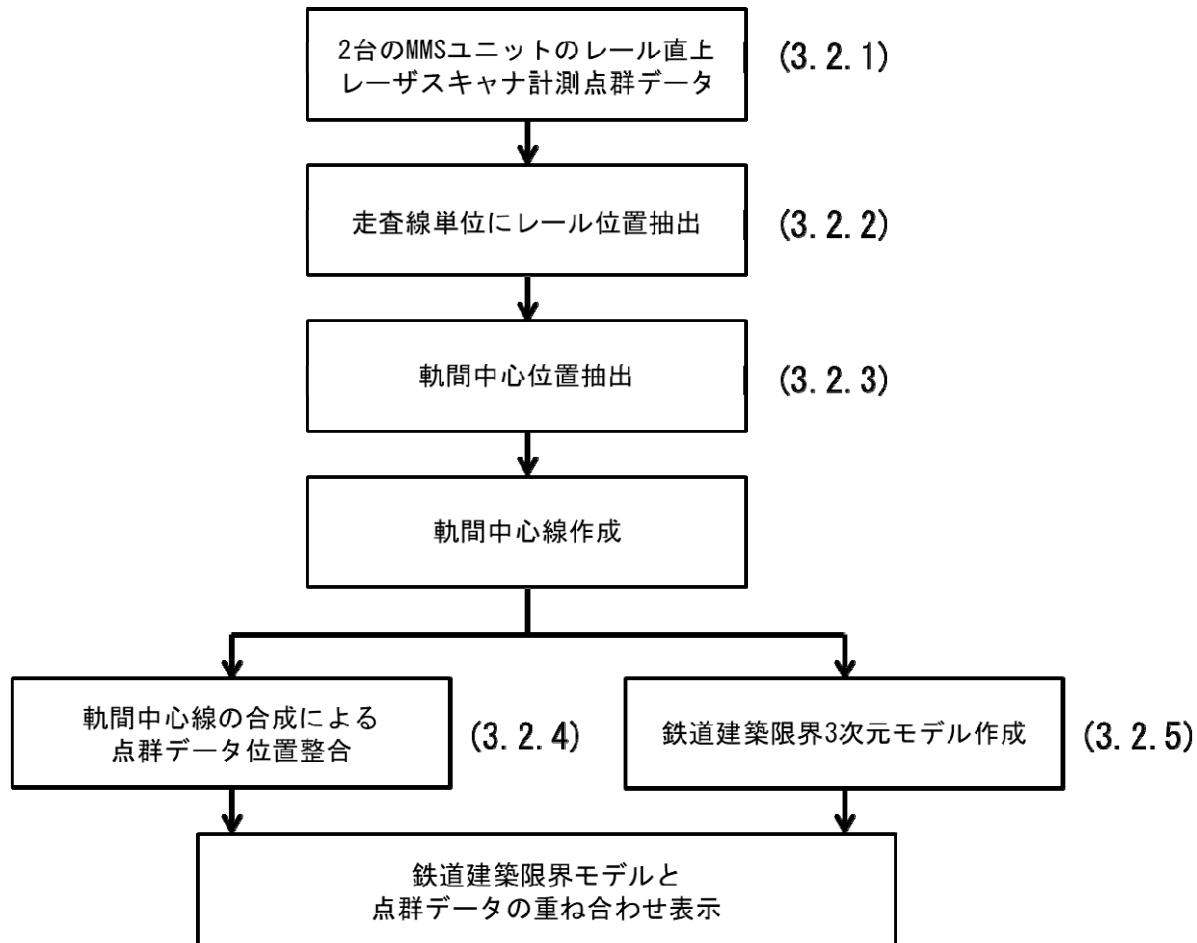


図-3.1 鉄道建築限界モデルの作成手法のフロー、括弧内の数字は詳述する項番号

3.2.1 2台のMMSユニットによるレール直上レーザスキャナ計測

レール直上レーザスキャナは、レールの頭頂面、底部が線対称に点群データを取得できる。従って線対称の中心が評価可能である。ここで、レール直上レーザスキャナは、レーザスキャナの受発光部の中心が、レール中心に0.005m以内、高さ3m以内に設置されるものとする。レール頭部の幅を65mmとしたときに、10点以上のレーザ点群が取得できる仕様とする。MMSユニットを2台使用して2本のレールの真上に位置するように設置して、点群データを移動取得する。

MMS ユニットで取得された点群データは、全ての点に、GNSS の時刻情報が付与されている。この時刻情報を用いることで、レーザスキャナの走査線ごとに点群データを抽出することが可能となる。1本の走査線は、レールの横断方向に約 5mm 秒単位で取得されているため、車両の移動取得時に生じる動搖の影響を受けず、点群データ間の相互の相対的な位置精度が保たれる。

3.2.2 走査線単位にレール位置抽出

レール直上レーザスキャナで取得した点群データから抽出した走査線単位の点群データを用いて、直下のレールの頭頂面の仮中心位置、側方のレールの水準位置の代表点を通る直線を生成し、軌間の位置で区切った線分と、その中点を軌間中心点として求める。図-3.2 に走査線と軌間中心点を示す。レールの断面を走査線上に点群データが並んでおり、レールの頭頂面を結ぶ線上に軌間と軌間中心点がある。図-3.3 にレール断面モデルと軌間中心点位置の関係を示す。

レール直上のレーザスキャナは、直下のレールの頭頂面、底部の幅全体の点群を取得することができる。しかし、レール頭頂面の点群データは、鏡面反射により、高さ方向に誤差が含まれる。その一方で、レーザ照射は、一定の角度間隔で行われるためレールの鏡面反射による距離の誤差の影響を受けない。そこで、レーザの測距精度が鏡面反射に影響されることを踏まえて、その誤差を軽減する手法を提案する。まず、頭部の側面にかけて丸みを帯びる部分は、レーザの入射角により実際の形状とは違う位置にレーザ計測点が現れる。そのため、MMS の取り付け位

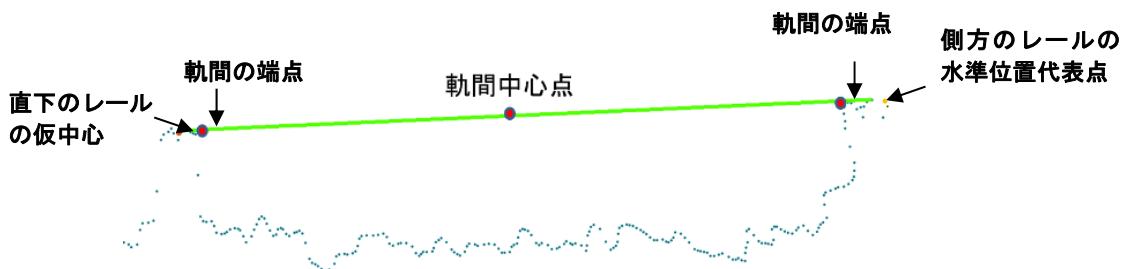


図-3.2 走査線と軌間中心点

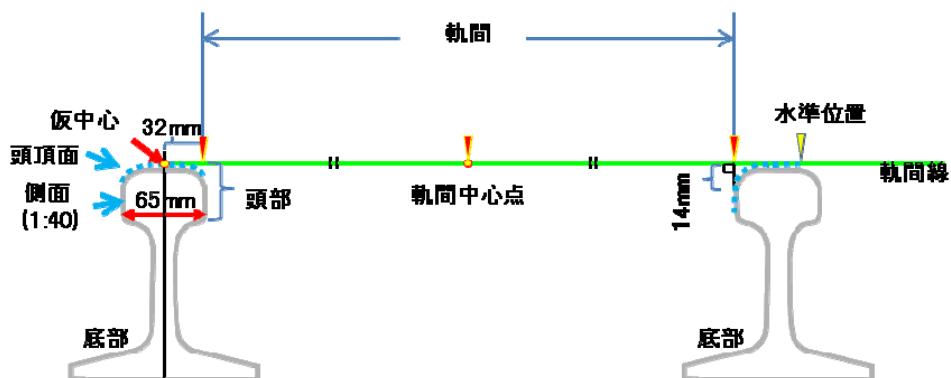


図-3.3 レール断面モデルと軌間中心点位置の関係

置から下方のレーザ点群データを直下から左右に 1.5m (すなわち路盤までの幅) ずつ抽出する。抽出した点群データの高さの最大値から 0.05m 以内の点群データを抽出することで、頭頂面の概ね同じ高さの計測点を抽出する。なお、踏切など、軌間内、軌間外の舗装板がレール頭部と同じ高さが連続する場合は、本手法が適用できない。

次に、抽出した計測点の座標値を用いて、水平方向の座標は平均値、高さ方向の座標は反射強度値による重み付けを行った加重平均値を算出する。これらの座標値により仮中心の位置を求める。計測点の数が n であり各計測点の座標を (X_i, Y_i, Z_i) ($i = 1, 2, \dots, n$)、高さ方向の重み付けに用いる反射強度を W_i ($i = 1, 2, \dots, n$) とした時、仮中心点の位置の座標 (X_w, Y_w, Z_w) は式 (3.1) の様になる。

$$\begin{aligned} X_w &= \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \\ Y_w &= \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \\ Z_w &= \frac{\sum_{i=1}^n W_i Z_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \end{aligned} \quad (3.1)$$

一方、レーザスキャナより斜め横方向に照射された側方のレール頭部の形状をとらえた計測点は、鏡面反射の影響や、入射角によるノイズが発生しやすい。特に、曲線区間では、頭頂面外側付近でレーザ入射角が 60°以上となり、頭部端の形状をとらえられない可能性がある。そのため、頭頂部付近の点群から、反射強度の値が標準偏差 (1σ) 以内の標高値が最大となる点を水準位置の代表点として抽出する。側方のレールの頭頂面の標高値の最大を採用すれば、鉄道建築限界は鉄道施設の位置に近づくため、より安全側の計測結果を得る。こうして、真下のレール頭頂面の仮中心点と、側方レールの水準位置の代表点を結線し、レール頭頂面を結ぶ線を作成し、ここでは、軌間線と称することとする。

3.2.3 軌間中心位置の抽出

次に、軌間線上に、軌間の端点の位置を求め、その中点を軌間中心点とする。仮中心点位置から軌間中心側にオフセットした位置を線分の始点とする。オフセット量は 32mm とする。この数値は、日本で一般的な規格である 50N および 60N レールの頭部の横幅寸法が 65mm と側頭部の勾配 1:40 から算出した値である。そして、側方レールの端点は、水準位置の代表点からの標高値の差が 14mm 以内かつ最も近い点を真下レール方向に探索し、その点から軌間線分に垂線を下した交点とする。端点の座標値から中点を求め、軌間中心点とする。これらの点を結線し、軌間中心線を生成する。

3.2.4 2台のMMSユニットの点群データの整合

1台のレーザスキャナで取得された点群データは、離れた場所にある支障物付近で、密度が不十分な場合がある。一方、TIN(不整三角形網: Triangulated Irregular Network)⁴⁶⁾で表現される鉄道建築限界3次元モデルデータに対して、施設付近の点群データから支障状況を正確に把握することは難しい。そこで、3次元表示画面上で、支障物の点群密度を増加するため、2台のレーザスキャナの点群データの位置を整合させる。点群データを位置合わせするために一般的に用いられる手法として、基準点などを用いて各点群データの位置座標を修正する方法がある。そこで、各レーザスキャナの点群データから抽出した軌間中心線の較差を計算し、点群データを走査線ごとに移動させる方法を提案する。具体的には、各軌間中心線を構成する軌間中心点のGNSS時刻を比較し、時刻が最も近い一組の点の座標値からベクトルを求め、走査線単位で点群データを平行移動する。鉄道建築限界3次元モデルと点群データを重畠表示し、鉄道建築限界と施設の位置関係を確認することが可能である。

3.2.5 鉄道建築限界3次元モデルの生成

鉄道建築限界の断面は、軌間中心線に鉛直な面に軌間中心点を原点として図形として描画する。鉄道建築限界断面の図形の横方向の寸法は、車両の偏倚のため曲線区間とその前後において拡大、縮減される。**図-3.4**に鉄道建築限界の拡大と車両の偏倚の関係を示す。近年の鉄道車両は、曲線通過性能と走行性能を両立させるため、車体に対して回転する構造をもったボギー一台車を採用することがほとんどである。車両を支える2台のボギー一台車が曲線区間をまたぐ場合、鉄道建築限界は、車両の前後の端、中間でそれぞれ外側、内側に膨らみ、その分だけ、鉄道建築限界の断面はその外側方向に拡大される。

その拡大量は近似式を用いることとする。ここでは、JRグループ³⁾で採用されている曲線半径R(m)における偏倚の拡大量Eの近似式である式(3.2)を用いる。

$$E = \frac{23,100}{R} \quad (3.2)$$

この拡大量は、鉄道建築限界の場所により異なる。電化区間における鉄道建築限界は、車両限界に余裕を持たせた「一般に対する限界」に対して、集電装置周辺に追加される個所である「上部建築限界」が加えられる。「上部建築限界」における拡大量は、台車のボギー中心と集電装置の

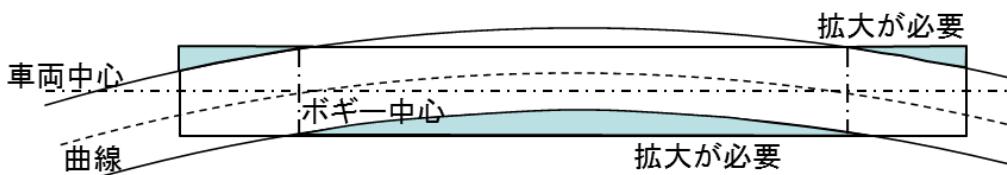


図-3.4 鉄道建築限界の拡大と車両の偏倚

水平位置が近いため、偏倚が縮小される。その拡大量は、「一般に対する限界」の $1/2$ となる³⁾。上部建築限界における拡大量 E' は式(3.3)となる。

$$E' = \frac{11,550}{R} \quad (3.3)$$

曲線区間では、直線区間における鉄道建築限界断面の拡大量が異なるうえ、拡大される位置も異なる。図-3.5に直線・曲線区間の鉄道建築限界の断面を模式図で示す。一般の建築限界の拡大量が上部拡大建築限界の図形は、上部において、曲線の内側方向、および外側方向に式(3.2), (3.3)で求めた E , E' の2倍の長さが拡大される。一方レール付近では、軌間の長さは拡大しないため、その外側において曲線の内側及び外側へ拡大量 E が増加する。このように、曲線区間では一般の建築限界と上部拡大建築限界の図形は軌間中心線に線対称となるように、異なる長さで拡大した断面を作成する。

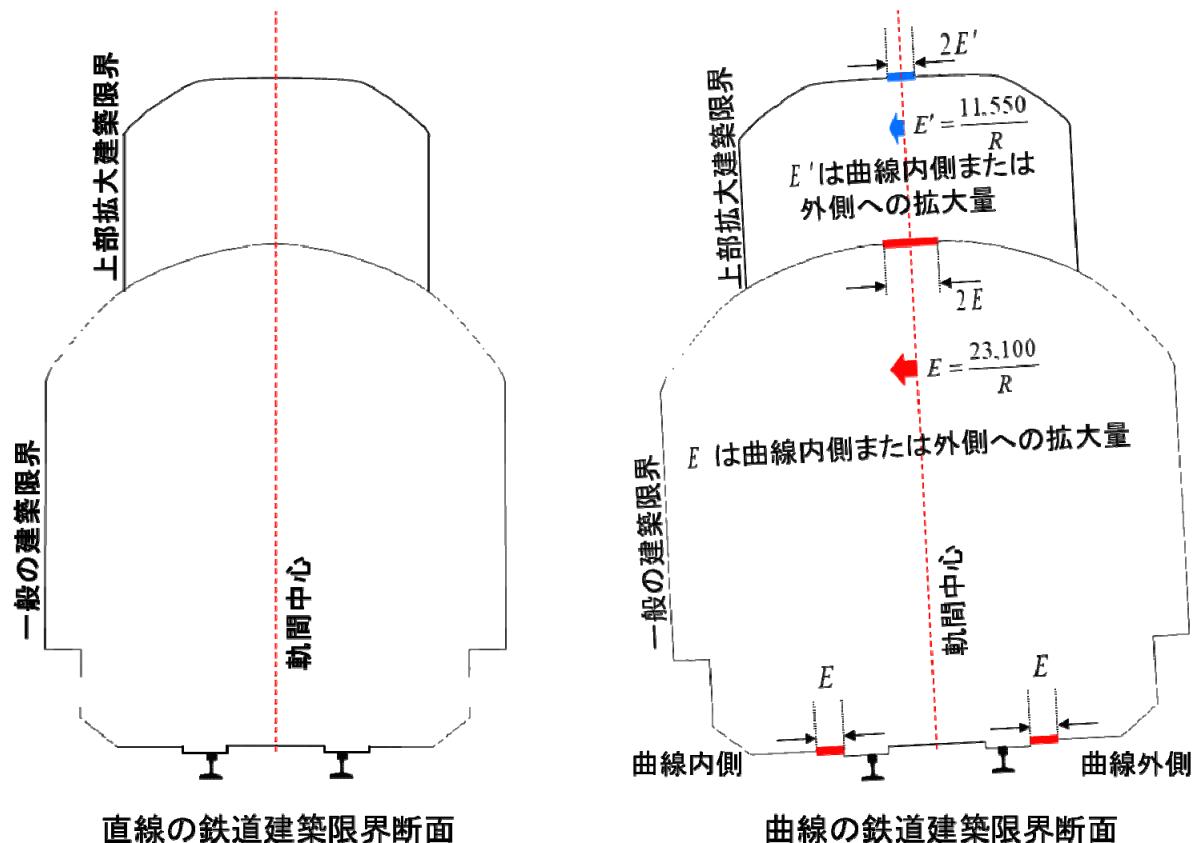


図-3.5 直線・曲線区間の建築限界断面

さらに、曲線区間での拡大量は、直線区間に向かって遞減される。その遞減される区間は緩和曲線区間に 17m の長さを加える。従って、緩和曲線区間の長さを L とするとき、遞減区間における、曲線終了区間から 1mあたりの拡大量 W および W' は、式 (3.4) および式 (3.5) のようになる。拡大建築限界の遞減区間を図- 3.6 に示す。

$$W = \frac{E}{L+17} \quad (3.4)$$

$$W' = \frac{E'}{L+17} \quad (3.5)$$

また、緩和曲線が無い場合は、曲線の終端から直線区間 17m にわたり遞減される。递減区間における鉄道建築限界断面は、連続的に拡大量を递減される。「一般に対する限界」と「上部建築限界」は拡大量が異なるため、递減する量も異なる。従って、递減区間は、異なる拡大量をもつ鉄道建築限界断面を、軌間中心線に鉛直になるように配置する。それらの断面間に、TIN を発生させて、縦断方向に連結した鉄道建築限界 3 次元モデルとして生成する。

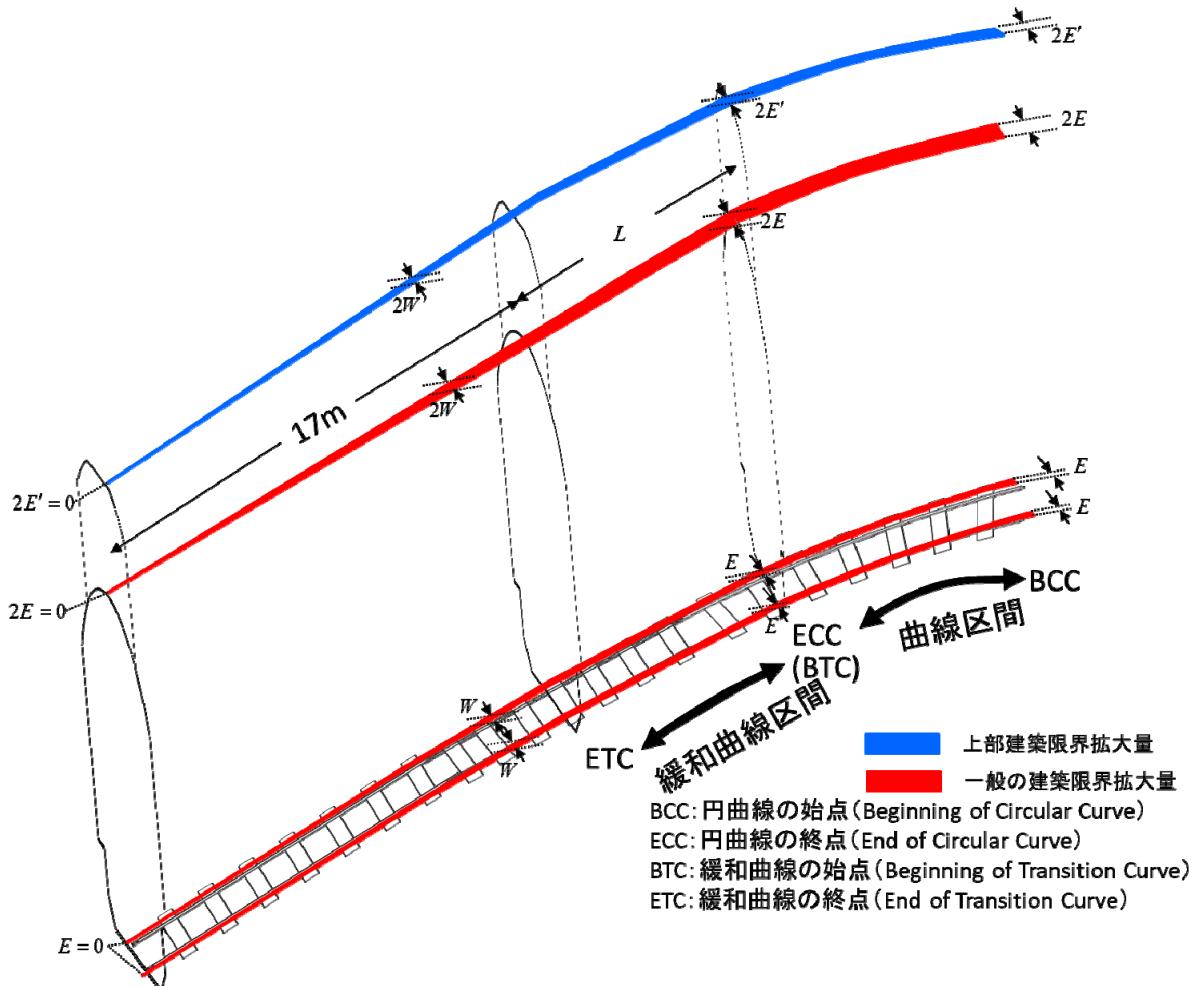


図- 3.6 一般に対する限界との拡大・遞減区間

3.3 実験方法

本章では、レール直上に配置したレーザスキャナにより取得された点群データを用いた軌間中心位置の抽出方法の妥当性を検証するため、トータルステーション（以下 TS）によるレール形状計測値と、提案手法により取得された軌間の値を比較した。抽出した軌間中心線を合成し、2台のMMSユニットの点群データを整合させた。また、鉄道建築限界3次元モデルの生成手法を評価するため、実際に、線路で取得した点群データから鉄道建築限界3次元モデルを作成し、線路上に配置した模擬支障物で鉄道建築限界の支障判定を行い、判定された結果の妥当性をTLSで計測した支障物の位置と比較して評価した。

3.3.1 対象の線路

線路作業用重機の性能試験に使用する線路を対象として、兵庫県神戸市の株式会社レンタルのニッケン神戸事業所で実験を行った。図-3.7に試験線路の計測位置概要を示す。約60mの直線区間と、途中で分岐する長さ約35mの曲線区間を対象とした。曲線半径150mだった。提案手法を評価するために行った軌間計測と支障物計測位置を示す。

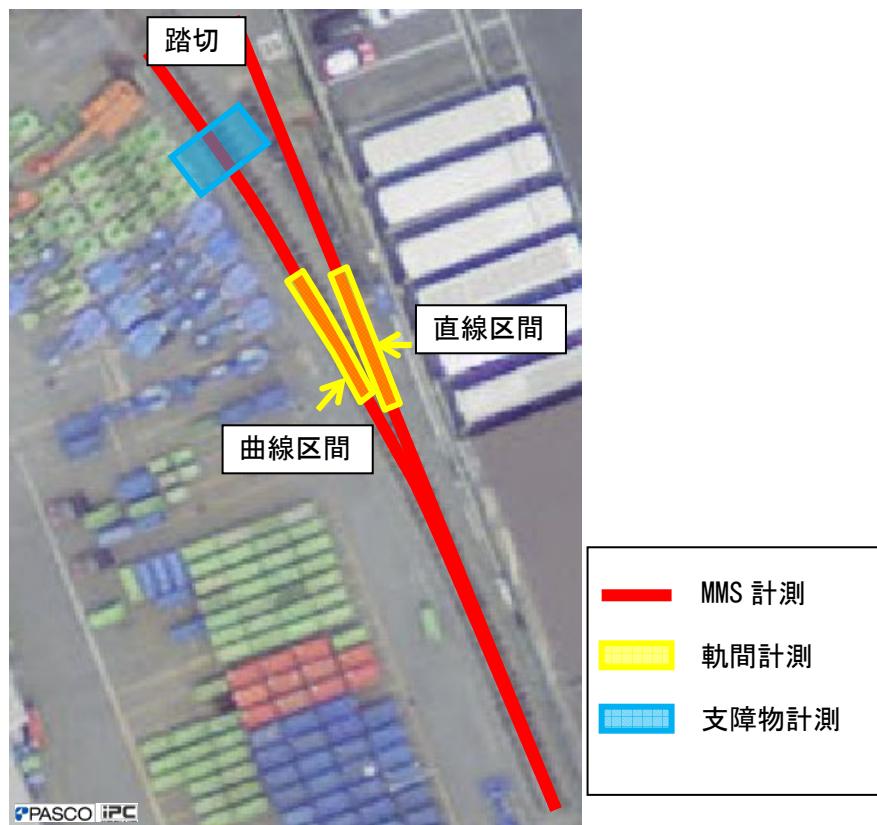


図-3.7 試験線路の計測位置概要

3.3.2 基準となる計測

レール直上レーザスキャナで取得される点群データの位置精度を確認するために、GNSS測量により1級相当の基準点を2か所に設置した。その基準点を用いて、整準台に検証点用のターゲットを設置後に観測した。使用した測量機器は、GNSS受信機：Nikon-Triple 社製NetR9、TS：S6 5+である。また、レール形状と軌間をTSで計測した。図-3.8に実験対象とした線路平面図と、TSによるレール形状測点位置を示す。測点は、レールの断面形状に沿って、頭部、底部を計20点取得した。レール断面は、曲線区間、直線区間を、レール1本あたり6断面を1m間隔に計測した。レール形状計測にはLeica Geosystems社製TS:TCRP 1201+を用いた。すべての計測点は、TSから10m以内の距離で、プリズム付ピンポールを使用して計測した。レール断面形状とTSの測点位置を図-3.9に示す。レールの底部表面と、レール頭頂面の比高を算出した。検証では、この比高値を用いて、レール直上レーザスキャナで取得した点群データから抽出した仮中心点位置と、底部表面の点群で幅が最大となる位置を結ぶ線との鉛直距離と比較をする。仮中心点位置の抽出がレール頭頂部の鏡面反射の誤差の軽減に効果があれば、比高と鉛直距離は近い値を示すと仮定したためである。

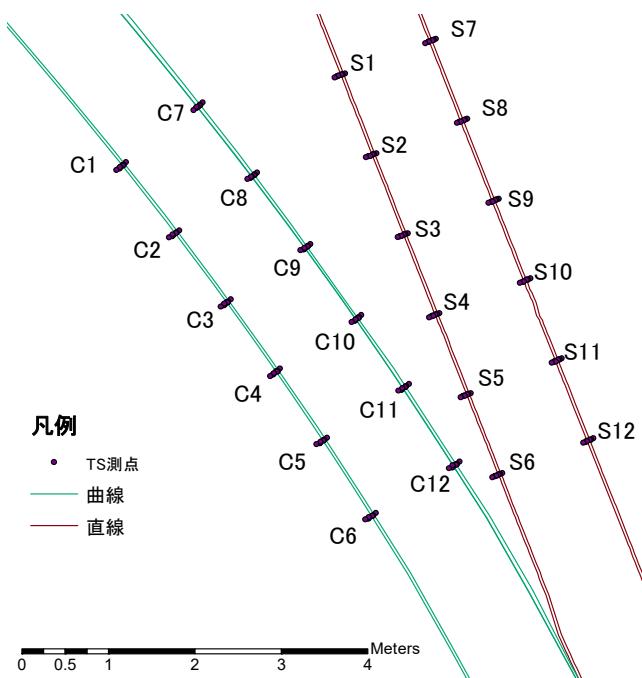


図-3.8 実験の対象とした線路の平面図とTSによるレール形状計測位置

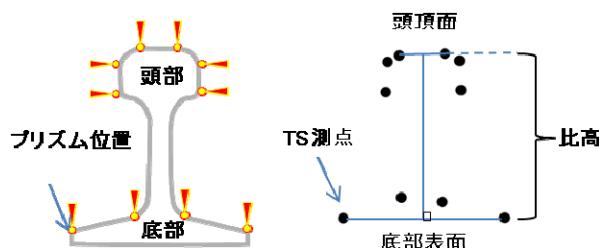


図-3.9 レール断面形状とTS測点位置

3.3.3 点群データの移動取得に使用したMMSと計測諸元

レール直上のレーザスキャナには、2台のLeica Geosystems社製Pegasus Twoを用いた。軌陸車に搭載し、線路を走行して点群データを取得した。図-3.10に外観を示す。Pegasus Twoは、自己位置と姿勢を測定するために、Novatel社製SPANを採用しており、レーザスキャナはZ+F社製のLaser Profiler 9012を搭載している。レーザスキャナは、進行方向の断面に対し 40° 、地面に対し 50° の入射角を持つように取り付けられている。入射角が面に対して 70° を越えなければレーザ計測は精度を確保している⁴⁷⁾。従って、レールの頭頂面や線路周辺の支障物の面に対する入射角は条件を満たすため、高精度かつ効率的に点群データを取得することが可能である。計測諸元を表-3.1に示す。進行方向の点間隔を0.02mとするように、MMSで点群データを移動取得した。



図-3.10 使用したMMS機材の外観

表-3.1 MMS計測諸元

項目	内容	
走行速度	14.4km/h	
MMS機材	Leica Pegasus Two	
自己位置精度	平面位置: 0.02m, 標高: 0.05m	
レーザ スキャナ	設置高さ	2.7または2.2m
	照射数	102万発/秒
	回転数	200回転/秒
	計測精度	$\pm 0.005\text{m}$
MMS点群 の点間隔	進行方向	0.02m
	横断方向	0.005m (5m先)

3.3.4 軌間中心位置の計算

鉄道建築限界の基準となる軌間の精度を確認するため、TS測点を用いてレール頭部左右の側面を測った軌間の長さと、提案手法により抽出した軌間の長さを比較した。

また、軌間中心点との抽出と軌間中心線を作成し、軌間中心線の位置を合成し、2台のMMSユニットの点群データの整合を図り、断面の状況を確認した。

3.3.5 鉄道建築限界3次元モデルの作成と支障判定

鉄道建築限界3次元モデルの作成手法についてプログラミングツールを作成した。模擬支障物を設置して支障判定した。支障判定した点群データをTLSで取得した点群データと比較し、鉄道建築限界3次元モデルの実用性を評価した。

まず、抽出した軌間中心線に沿って、拡大建築限界図形を作成した。曲線半径は150mとして拡大量と透減量を算出し、「一般に対する限界」および「上部建築限界」の幅をそれぞれに拡大させ、TINで連結し、鉄道建築限界3次元モデルを生成した。

また、曲線区間に模擬支障物を設置し、鉄道建築限界3次元モデルを用いる建築限界の管理において、実用上に問題が無いか確認した。模擬支障物の設置概要、図-3.11に示す。配置場所は、曲線区間であり、レールの軌間が曲線の内側に傾斜しているため、鉄道建築限界は拡大された状態で傾く。そこで、鉄道建築限界を支障するレーザ点群データを取得するため、高所作業車両のかごに木材を設置し、上部建築限界に近い位置、すなわち、軌間中心からの「離れ」が約1m、「高さ」が約5m付近に静止させた。



図-3.11 支障物の設置状況

模擬支障物の配置は、上部建築限界の境界に近い位置に連続的に配置した。図-3.12に配置状況を示す。垂直方向に約0.25m間隔で材木を並べて、下からNo.1~3の順に支障物を配置した。さらに、支障物が進行方向に連続する状況を想定し、No.3と同じ高さで、0.75m離れた位置にNo.4を設置した。

こうした実験環境に、鉄道建築限界3次元モデルを用いて整合した2台のMMSユニットの点群データを3次元ビューワソフトウェアのツールを用いて支障判定した。支障判定された位置をTLS:Leica Geosystems社製P40により3次元計測したデータを用いて支障物の位置精度を比較して実用性に問題が無いか評価した。

支障判定の方法には、球面投影による多面体の内外判定法⁴⁸⁾を用いた。この方法は、点群データを中心とする、半径1の球の表面上に、鉄道建築限界3次元モデルを構成する全ての3角形を投影した面積の総和を求ることで、モデルの内外のどちらにあるかが判定できる。そのため、レーザスキャナデータの走査線上の点群データに順次に内外判定を行うことが可能である。鉄道建築限界の内側にあると判定された点群データは、軌間中心線からキロ程位置を求め、「離れ」と「高さ」を属性とし、過去の情報と合わせた管理が可能である(図-3.13)。



図-3.12 高所作業車のかごと模擬支障物の配置

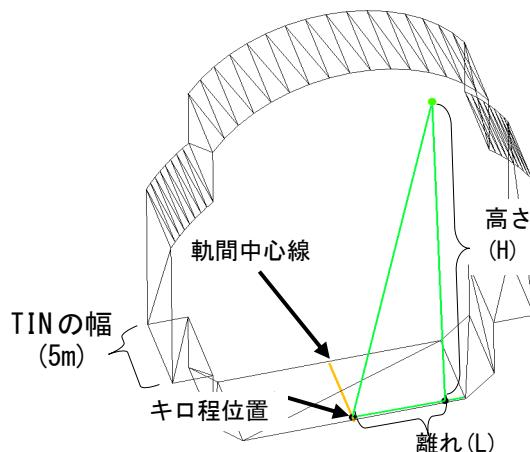


図-3.13 支障判定点の離れと高さの関係

3.4 実験結果と考察

3.4.1 MMS で移動取得した点群データ

MMS で移動取得した点群データの精度を確認するために、より高精度な測量手法で計測した数値と比較した。計測結果の比較のため、座標値は、平面直角座標系⁴⁹⁾の第5系に統一することとした。

実験における移動取得時間は、MMS 機材が踏切で載線し、離線するまでの時間は 40 分間であり、その計測時間は 10 分間であったことから、再離線に要する時間は 30 分、すなわち 0.5 時間と考えられる。通常の列車間合いは 2~4 時間であり、その間に計測できる時間は 1.5~3.5 時間となる。別の地点で同 MMS 機材の平均速度は、約 12km/h であったことから、同時間には、18~42km の計測が可能である。一方、従来の特殊な定規とレーザ距離装置を使用し、人力により 5m 間隔で計測した場合、同時間内での計測距離は、約 0.3~0.9km となる。従って、本提案手法により、作業効率が著しく向上すると考えられる。

取得した点群データの精度を表- 3.2 に示す。TS の検証点と比較し、点群データから計測した座標値の較差の平均は 0.01m 以内で、標準偏差は水平方向には、0.007m から 0.012m で、高さ方向には 0.012m~0.017m だった。2 台の MMS を使用して移動取得した点群データは、位置情報の品質に問題が無いことを確認した。

まず、TS の計測点から算出したレール頭頂部からレール底部表面との比高と、レール直上レーザスキャナの点群データから算出した仮中心点と、レール底部表面の最大の幅の点を結んだ線との鉛直距離を比較した結果を表- 3.3 に示す。直線区間において、測点 S1 から S12 まで、往路復路ともに TS の計測点の較差の平均値は 2mm 以内で標準偏差が 1mm と 1.2mm だった。一方、曲線区間において、測点 C1 から C12 まで、TS の計測点との較差の平均値が -3mm~ -4mm で、標準偏差は 1.2mm と 2.7mm だった。

直線区間では、1mm~2mm と、レーザスキャナの計測性能に近い数値であったため、提案する鉄道建築限界 3 次元モデルの作成手法は、レール表面の鏡面反射の影響を軽減できる可能性が高

表- 3.2 各 MMS ユニットと TS 検証点との比較

単位 (m)				
MMSの位置と較差		x	y	z
左MMS ユニット	標準偏差	0.012	0.010	0.012
	平均	-0.005	-0.003	-0.078
右MMS ユニット	標準偏差	0.007	0.007	0.017
	平均	-0.007	-0.004	-0.005

表- 3.3 曲線区間及び直線区間における TS 計測点とレール直上レーザスキャナの点群データのレール頭頂部とレール底部表面の比高の平均値と標準偏差

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	平均値	標準偏差
TS計測比高	158.8	158.1	159.3	160.7	157.7	159.2	159.6	157.7	156.7	158.0	157.7	160.3	158.6	
曲線往路比高	163.6	163.8	160.5	160.1	162.6	163.1	156.5	162.2	159.0	162.9	163.0	162.8	161.7	2.2
曲線往路較差	-4.8	-5.7	-1.2	0.6	-4.9	-3.9	3.1	-4.5	-2.3	-4.9	-5.3	-2.5	-3.0	2.7
曲線復路比高	163.6	163.4	164.1	164.1	163.7	163.2	162.7	160.5	160.8	160.6	162.4	162.3	162.6	1.3
曲線復路較差	-4.9	-5.3	-4.8	-3.4	-6.0	-4.0	-3.1	-2.8	-4.1	-2.6	-4.7	-2.0	-4.0	1.2

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	平均値	標準偏差
TS計測比高	127.5	127.5	127.0	128.5	127.5	127.5	124.5	125.5	124.5	125.5	124.0	124.5	126.2	
直線往路比高	131.3	130.5	127.8	129.8	128.0	129.3	125.5	125.4	127.0	128.3	126.6	127.1	128.0	1.9
直線往路較差	-3.7	-3.0	-0.8	-1.2	-0.5	-1.8	-1.0	0.1	-2.5	-2.8	-2.6	-2.7	-1.9	1.2
直線復路比高	128.0	129.0	129.2	131.5	130.3	126.8	126.8	128.5	125.2	125.5	125.5	125.6	127.8	2.1
直線復路較差	-0.4	-1.5	-2.2	-3.0	-2.8	-1.0	-2.2	-2.9	-0.6	0.0	-1.5	-1.1	-1.6	1.0

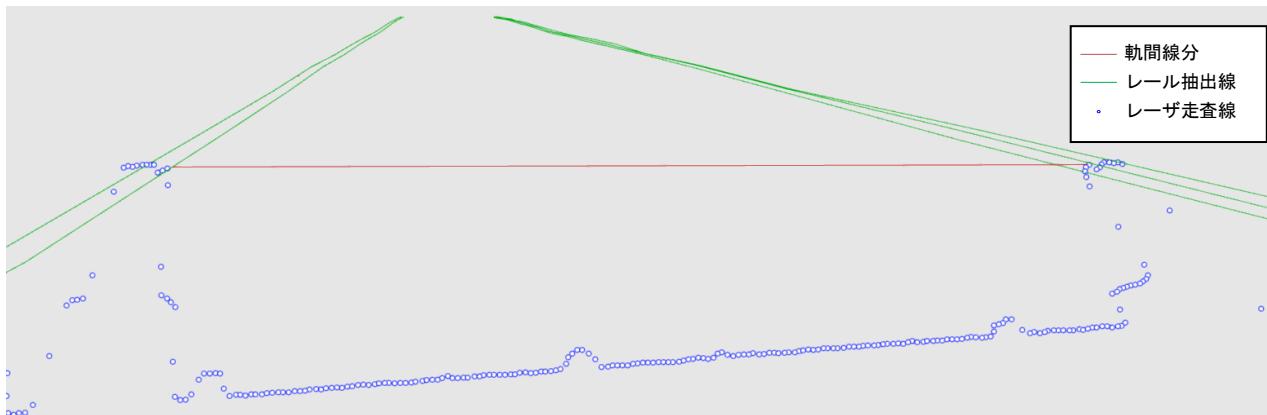


図- 3.14 軌間線分の抽出例

いといえる。一方、曲線区間において、較差が 4mm 前後と比較的に較差が拡大した。原因として、レール底部の計測点数が不足したことが考えられる。実験線路で、MMS 本体から 2.4m 離れた位置で曲線のレールをレーザ照射して測る時、曲線半径 150m の路線において、レーザスキャナからレール頭頂部との相対的な位置関係は内側に水平距離で約 0.02m ずれる。従って、レール頭部によりレーザ照射点が当らないレール底部の範囲が拡大することで、レール底部の点群データの数が減り、点を結ぶ底部表面の線分の高さに誤差を生じたためと考える。ただし、実験線路の曲線区間のように急な曲線は、営業線では極めて限定されているため、MMS 機器の取り付け位置を 0.02m ずらす調整をして設置する方法で対処することができる。

3. 4. 2 軌間の比較

レール直上に設置したレーザスキャナの点群データから軌間中心点を求めるアルゴリズムを、点群ビューワソフトウェアで動作するプログラムを作成し、軌間の長さを抽出した。図- 3.14 に直下のレールの仮中心位置と側方レールの軌間位置を用いたレール抽出線と軌間線分の例を示す。TS 測点から算出した軌間と、レール直上スキャナ 1 台分の点群データから自動抽出した軌間との比較を表- 3.4 に示す。1 台分の点群データから自動抽出した軌間の較差の平均値は、直線区間で

-0.4mm、標準偏差は0.9mmであり、曲線区間での平均値は、0.5mmで標準偏差は0.4mmだった。軌間の長さは、直線区間、曲線区間とともに計測機器の測距性能である±0.5mmとほぼ同じ較差であった。そのため、軌間中心位置が、TS計測と比較して、1mmから2mm程度の差で計測可能と考えられる。

3.4.3 2台のMMSユニットの点群データの整合

2台のMMSユニットの点群データから、軌間中心線を作成し、軌間中心線を構成する軌間中心点のGNSS時刻を比較した。時刻が対応する各点の座標の組み合わせを作り、GNSS時刻別に移動するベクトルを求め合成した。図-3.15にC5からC11にかけての断面で整合した結果を示す。ここで、表-3.1MMS計測諸元に示した進行方向の点群間隔に合わせ、断面の厚さは0.02mとした。各軌間中心点のGNSS時刻の間はベクトル移動量を線形補間した値を内挿した。

表-3.4 TSの計測点と、MMS1台のレール直上レーザスキャナの点群データの軌間の

平均値と標準偏差の比較

単位(m)

曲線軌間	C1-C7	C2-C8	C3-C9	C4-C10	C5-C11	C6-C12	平均	標準偏差
TS	1.077	1.072	1.070	1.068	1.070	1.069	1.071	
MMS1台	1.076	1.071	1.071	1.068	1.070	1.068	1.071	0.003
MMS1台較差	0.001	0.001	-0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001

直線軌間	S1-S7	S2-S8	S3-S9	S4-S10	S5-S11	S6-S12	平均	標準偏差
TS	1.065	1.062	1.062	1.061	1.059	1.059	1.061	
MMS1台	1.067	1.065	1.064	1.066	1.064	1.067	1.065	0.001
MMS1台較差	-0.002	-0.003	-0.002	-0.005	-0.005	-0.008	-0.004	0.002

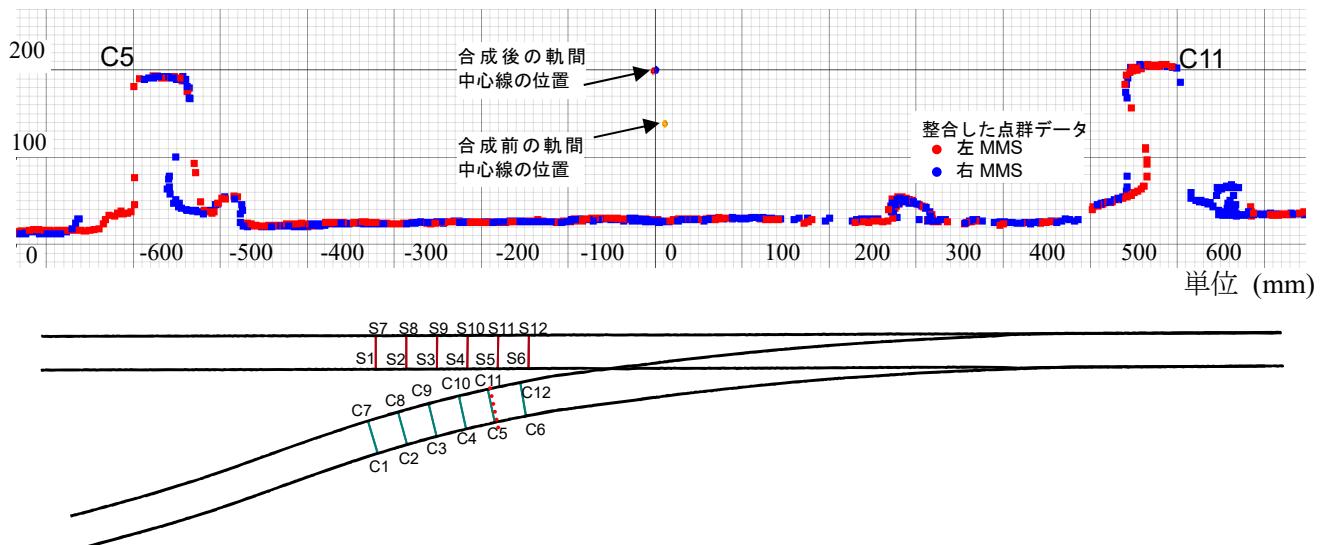


図-3.15 軌間中心線の合成による2台のMMSユニットの点群データの整合処理後の断面図

各走査線点群データはベクトル移動量に従って平行移動した。試験線路の踏切に向かって右のMMSの検証点の較差が左のMMSの較差よりも小さいことから、右のMMSデータを基準として、左のMMSの点群を走査線単位で移動させた。その結果、左のMMS

の点群データとの較差はレール頭頂部付近で 0.01m 以内となり、2 台の MMS ユニットの点群データを断面表示し、点群密度が増える効果を得られた。この点群の整合手法の長所は、軌間中心線の区間を限定した処理が可能な事であり、処理時間および、表示時間を短縮できることである。また、調整点の入力は必要が無く、一連の処理を自動的に行うことができる。仮に一台のレーザスキャナをレールの真上に位置するような MMS を往復させる方法を取った場合は、GNSS 時刻を合わせる作業や、軌間中心位置上に調整点を設ける作業が必要となり、2 台のレーザスキャナで同時に計測する方法は、精度、作業時間の面で優れていると言える。

3.4.4 鉄道建築限界 3 次元モデルの作成

在来線の交流電化区間を想定した鉄道建築限界を図-3.16 に示す。試験線路の曲線区間の半径は 150m で、式 (3.2), 式 (3.3) を用いると、偏倚における「一般に対する限界」の拡大量 E は 154mm、「上部建築限界」の拡大量 E' で 77mm と求められる。

通常の鉄道建築限界と比較し、左右に、それぞれの拡大量が増幅されており、鉄道建築限界断面は曲線区間から直線区間にかけて式 (3.4), 式 (3.5) から求めた W および W' を曲線区間端点か

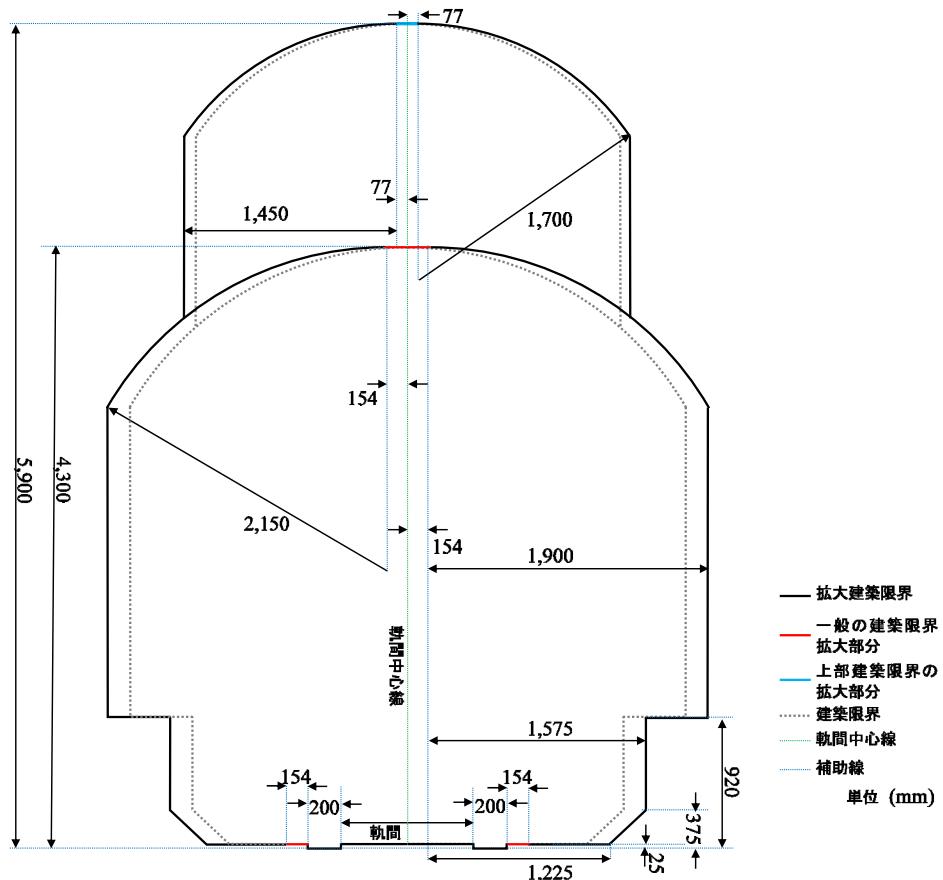


図-3.16 在来線交流電化区間の鉄道建築限界と曲線半径 150m 区間での拡大量

らの距離に従って遁減させながら、拡大量が 0mm となるように変化をさせてゆく。図- 3.17 にツールにより生成された鉄道建築限界断面と 3 次元モデルを示す。まず、軌間中心線に沿って配置したその地点での建築限界断面に対して、連続性を確認できるように TIN を作成し、ワイヤーフレームモデルを表示した。

		曲線区間	直線区間（分岐器区間を含む）
建築限界断面	上面図		
	側面図		
建築限界モデル	上面図		
	側面図		
鳥観図			

図- 3.17 鉄道建築限界断面と 3 次元モデル

また、縦断方向の間隔を0.5m単位で断面を配置し、断面間をTINで連結した。図-3.18に、曲線から直線にかけて拡大量を遞減した鉄道建築限界3次元モデルを示す。移動取得に起因する、縦断方向における連続性の異常な箇所は確認できなかった。また、青色で表示される帯状の図形は上部建築限界における拡大部分である。17mの区間で0.5m毎に約8.5mmの割合で遞減され、拡大量が0mmの場所で、青色の帯状図形が閉じている。

提案手法では、レーザスキャナ走査線の間隔で拡大量と遞減量を鉄道建築限界断面図形に割り付けることが可能である。そのため、さらに詳細で連続的な変化に対応可能な鉄道建築限界3次元モデルを作成することで、正確な支障物判定に用いることが可能と考える。また、60mの鉄道区間を対象として2台のMMSユニットの点群処理から鉄道建築限界3次元モデルの自動作成までに要した処理は約1日であり、距離が伸びても夜間自動計算が可能である。一方、3次元CADでモデルを作成する場合、経験的に60m区間に對しては約1.5日かかり、距離が伸びれば、要するマンパワーはほぼ線形的に比例して増えていく。従って、本研究の手法は効率化に大きく貢献すると考えられる。

3.4.5 鉄道建築限界の支障判定

鉄道建築限界の支障判定するアルゴリズム実装したプログラムを作成し、前項で作成した鉄道建築限界3次元モデルと、調整計算した2台のMMSユニットの点群データを用いて鉄道建築限界の支障判定をした。結果を図-3.19に示す。「上部建築限界」において、No.1, 2の支障物は鉄道建築限界を支障しており、No.3, 4の支障物は鉄道建築限界に近接している状況が確認できた。

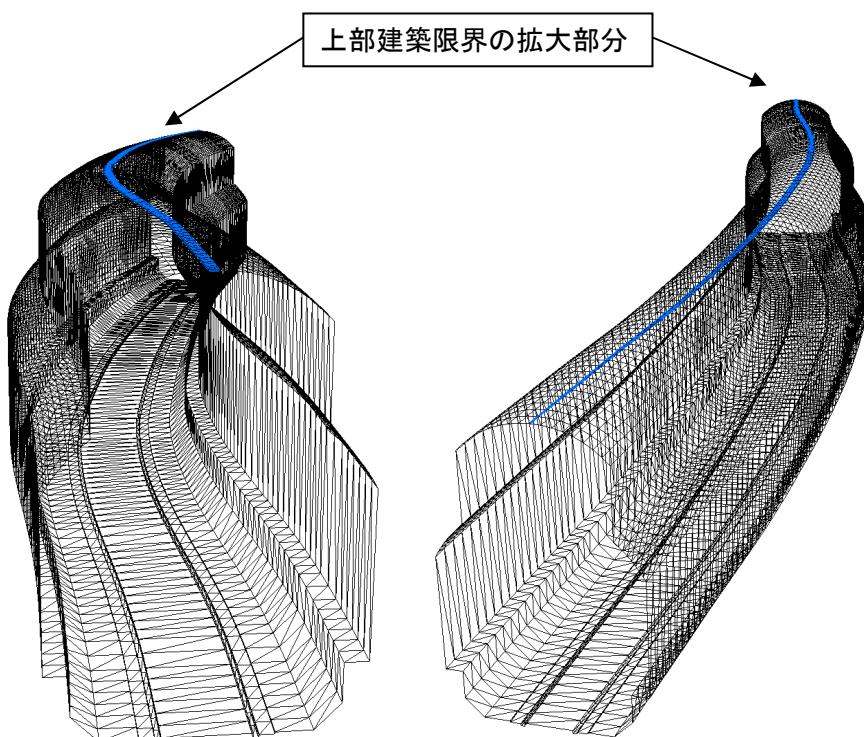


図-3.18 曲線半径150m曲線区間で拡大し直線区間17mで遞減した鉄道建築限界3次元モデル

TLS と各 MMS の点群データを比較した結果を表- 3.5 に示す。 「離れ」， 「高さ」は， 0.01m～0.02m 程度の差が生じた。

2 台の MMS ユニットの点群データを用いて支障判定を比較すると， No. 4 の支障物について，右の MMS の点群データでは支障判定され，左のレーザでは支障判定されなかった。これは，整合した 2 台の MMS ユニットの点群データの較差が 0.01m 程度であることが原因と考えられる。

ただし，支障物を漏れなく網羅的に取得するという観点では，2 台の MMS ユニットの点群データを用いることは有効であると考える。支障物に照射される点群数が表示画面上では増加し，支障物の可能性がある点群データが抽出可能なためである。また，抽出された支障物はどちらの MMS の点群データか区別が可能であるため，支障物との位置関係を確認することができる。従って，本提案手法により，支障物の位置をとらえる可能性が向上すると言える。

また，経年変化の観察を考慮する場合は，3 次元座標で管理することが重要と言える。MMS によるレーザスキャナ計測だけではなく，TLS などで計測した点群データを，過年度の鉄道建築限界と比較する場合には，3 次元座標で支障判定ができるからである。

表- 3.5 TLS とレール直上のレーザスキャナ (MMS) の点群データの支障判定位置

単位 (m)

支障物		No. 1		No. 2		No. 3		No. 4		平均値	
		離れ	高さ								
TLS	測定値	1.189	4.943	1.171	5.222	1.150	5.497	1.081	5.513	1.148	5.294
左 MMS	測定値	1.188	4.942	1.162	5.230	1.140	5.507	1.070	5.520	1.140	5.300
	較差	0.001	0.001	0.009	0.008	0.010	0.010	0.009	0.007	0.007	0.007
右 MMS	測定値	1.192	4.937	1.157	5.242	1.157	5.491	1.057	5.533	1.141	5.301
	較差	0.003	0.006	0.014	0.020	0.007	0.006	0.024	0.020	0.012	0.013

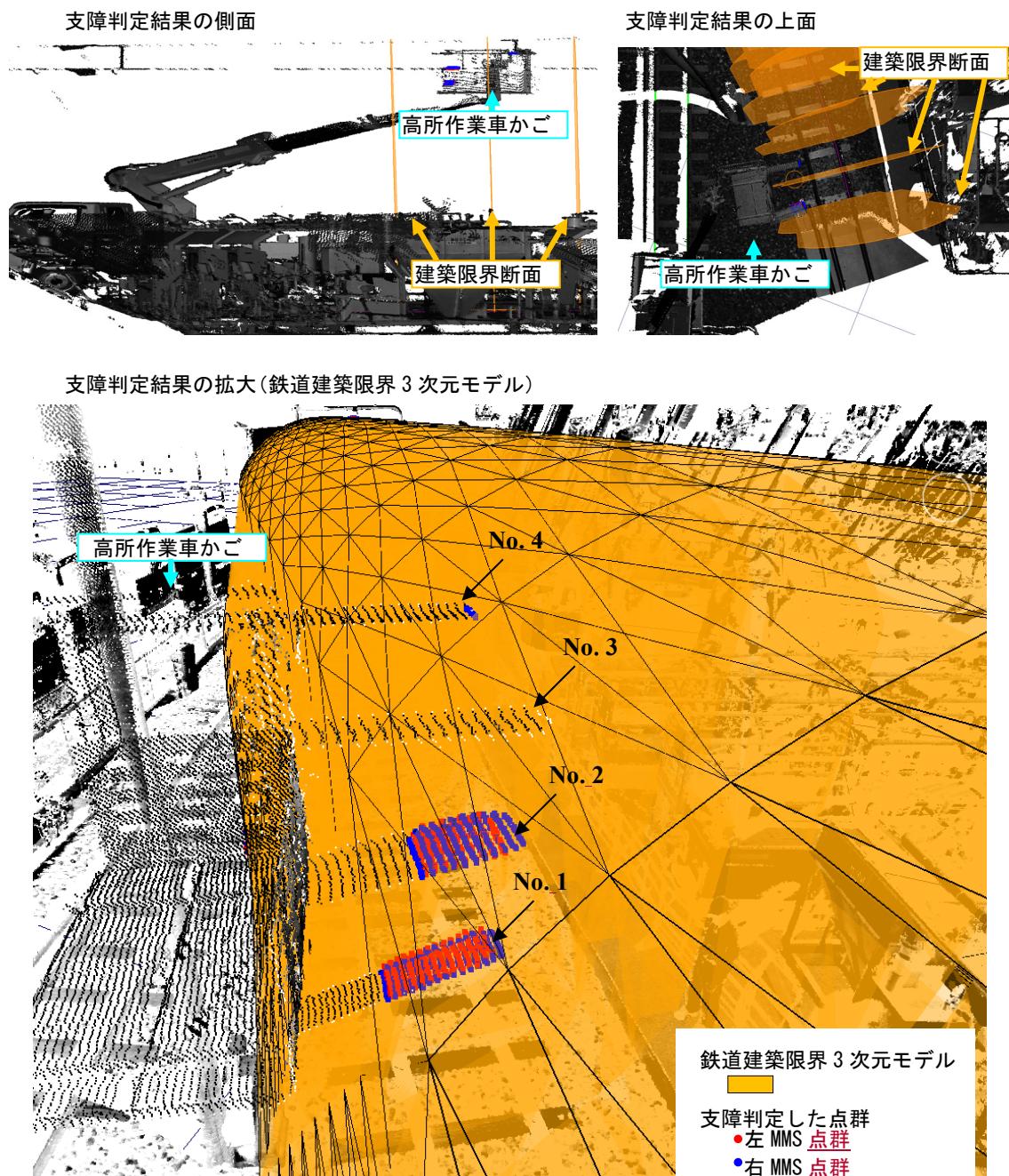


図- 3.19 模擬支障物の判定結果

表 5 TLS とレール直上のレーザスキャナ (MMS) の点群データの支障判定位置

3.5 まとめ

本研究では、2台のMMSユニットのレーザスキャナを各レールの真上に設置して取得した3次元点群データから、軌間中心位置を求める場合のレールの鏡面反射の影響を高さ方向に限定し、反射強度値を用いて加重平均することで、レールの高さの精度を確保する手法を提案した。この手法により、軌間中心線を求め、線路に沿った鉄道建築限界を連続的に拡大、遅減した3次元モデルを自動的な処理で生成することが可能である。そのモデルを使って、MMSで計測した3次元点群データを演算して判定し、支障物を抽出し、軌間中心位置からの水平距離「離れ」と鉛直距離「高さ」を求めることができた。さらに、軌間中心線を合成して整合した2台のMMSユニットの点群データを重畠表示することで、支障物の位置を捉える確率が向上した。このことが、実際の営業線路へ適用し検証されれば、鉄道建築限界管理に資するものと考えられる。

提案手法、TSおよびTLSを用いて試験線路で実験したところ、0.02m以内の精度で、支障物を抽出できることが分かった。

また、曲線区間においてMMSなど地面に鉛直ではないレーザスキャナをレールの真上に設置して計測をする場合には、レーザスキャナの設置位置が高いと、レーザ照射距離が伸び、走査線が線路の長手方向に対して斜めになるため、レール底部のオクルージョンが増えることが分かった。

本研究で、レール真上にそれぞれ設置したレーザスキャナを用いて取得した点群データが、鉄道建築限界の適用に耐えうる結果であることを確認できた。言い換えれば、2台分のレーザスキャナを同時に使用することで、点群データの密度が増え、支障物判定の正確性が向上することが明らかになり、安定した鉄道建築限界の可視化が可能となった。

今後は、新幹線や世界の鉄道で用いられている軌間である標準軌のレールへの拡張や、実際の営業線路での検証を行う。さらに、保線の管理のために、レール自体のマクラギに対しての傾きを、レーザ点群で算出する手法を研究する。

第4章 2台のレール直上レーザスキャナのキャリブレーション手法

4.1 本章の概要

第1章で述べた、大都市圏の鉄道事業者が採用する高度な手法による維持管理業務は、その他の鉄道事業者とては、予算の制約により採用が困難であり、実際は、職員による巡視・点検時の目視調査に頼る現状である。こうした状況に対応するためには、汎用的な計測手法と、効率的に線路を移動する手段の組み合わせが必要である。また、第2章にあるように海外、国内では、線路を効率的に計測するため、MMSによる3次元計測手法が提案されている。MMSは車両に固定または着脱可能なタイプに大別できる。専用の車両に複数のレーザスキャナを搭載したMMSを用いる場合、保有のための費用が掛かることが問題である。さらに、専用車両に搭載したMMSはセンサの配置が固定され、計測対象施設によりレーザの照射位置を調整することは困難である。一方、作業用のトロッコ等にMMSを搭載し計測する場合、線路を移動するために保守用車で牽引する方法は、運転資格者や作業時間の調整が必要なため、安全管理条件から制約をともなう。また、手押しのトロッコは、移動に時間がかかるため、装置の着脱する作業を計測対象付近の線路上で行うことになる。そのため、列車間合いの限られた作業時間内で長距離の計測は困難である。

第3章では、こうした計測条件について対応するため、軌陸車にレールの直上に2台のMMSユニットを備える計測システムを構築し、レールの形状を用いて、軌間と中心位置を正確に把握する手法を提案した。レールの直上にレーザスキャナが位置することにより、頭部の鏡面反射の影響を高さ方向に限定し、反射輝度値による重み付計算によりレール高さの精度が向上した。さらに、軌間中心線を求め、2台のMMSのレーザ点群を比較的に高精度に整合する手法を提案した。このシステムハードウェアは、線路内で用いる工事用のレンタル機器として調達可能であるため、安全管理面の問題や、コスト面での制約が少ない。図-4.1に2台のMMSユニットの外観を示す。

これらの手法では、レーザ点群データからレール位置を解析してGNSSの時刻を利用して軌間中心線の位置を合成するため、3次元復元処理を再度行う工程が必要であった。これは、数10kmの計測範囲となると、膨大なデータ処理時間となり、計測全体工程のボトルネックとなる可能性がある。

そこで、本章では、鉄道建築限界管理に要求される精度である0.01m以内の精度を満たし、2台のMMSのレーザ点群データの整合処理時間を短縮することを目的として、1台の位置姿勢情報を利用して、もう1台のMMSに装着されているレーザスキャナについての外部標定要素（センサ位置と3軸の傾き）をキャリブレーションして求め、レーザ点群データの整合を図る手法を提案する。外部標定要素を求める計算方法には、非線形の最小二乗法のLM法を適用した。実際に試験線路を走行して計測を行い、2台のMMSのレーザ点群データ整合性を検証する。なお、試験線路では、踏切を通過して移動取得できない環境のため、レール区間を検証対象とした。

2台のMMSユニットを現地で搭載した後、対象線路の計測の他に、均一な面を持つボードを

鉛直に設置した延長 30m を移動取得することで、外部標定要素を求めることが可能となる。その外部標定要素を用いた 1 度の 3 次元復元処理で、2 台のレール直上のレーザスキャナのレーザ点群を整合させることが可能となる。

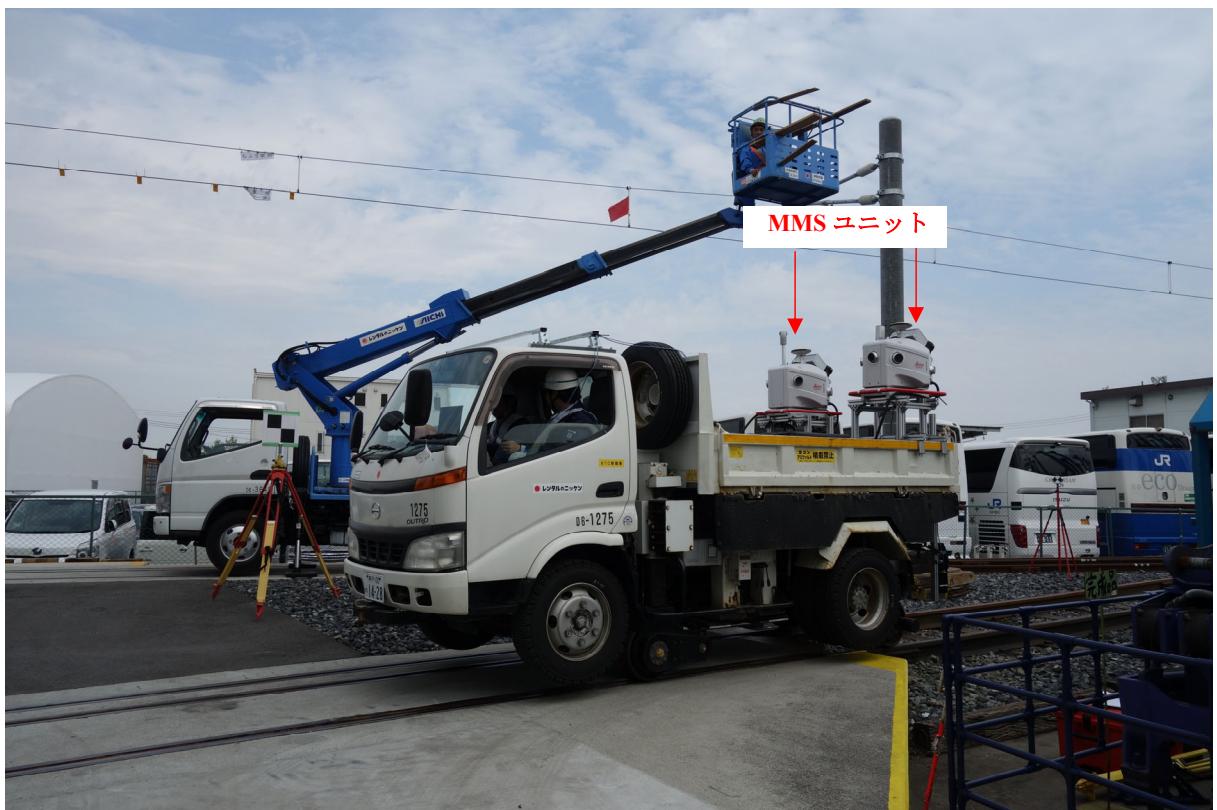


図- 4.1 2 台の MMS ユニットの外観

4.2 レーベンバーグ・マルカート法による外部標定要素計算手法

本研究では、2台のMMSのレーザスキャナで取得した各レーザ点群データをキャリブレーションにより整合させる手法を提案する。基準となるMMS(MMS-a)の位置および姿勢に対して、別に稼働するMMS(MMS-b)のレーザスキャナをキャリブレーションし、MMS-aとMMS-bのレーザ点群を整合させる。キャリブレーションに用いるLM法による外部標定要素計算手法のフローを図-4.2に示す。2台のMMSユニットの相対的な位置は固定されており、各MMSのGNSS時刻がレーザ点群に付与されていることを前提条件とする。また、各MMSのレーザスキャナの視野角(FOV: Field Of View)は等しく、死角(オクルージョン)は無い状態で計測されるものとする。レーザ点群から算出した座標と平面の残差を最小とするように、非線形最小二乗法であるLM法を用いて未知量が収束するまで繰り返し求めるものとする。

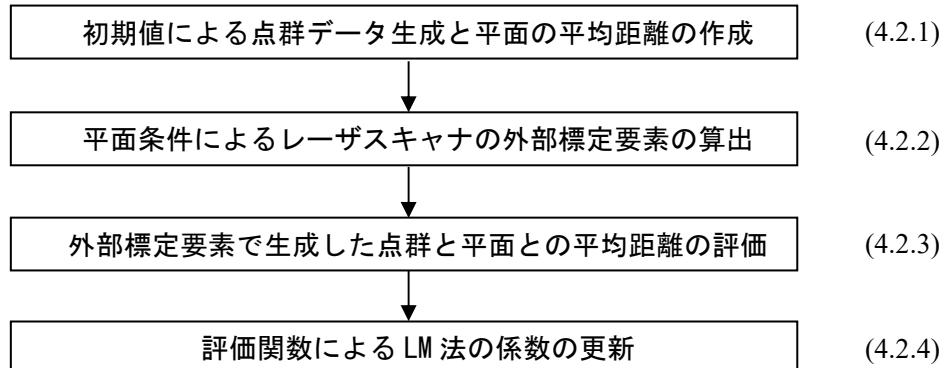


図-4.2 LM法による外部標定要素計算手法フロー

4.2.1 初期値によるレーザ点群座標と平面との平均距離の作成

MMS-aの車両GNSSとIMUのデータ(総称してPOS:Position and Orientation Systemと呼ぶことにする)に対して、MMS-bのレーザスキャナ原点と3軸の傾きの初期値を用いて式(4.1)でレーザ点群データを3次元復元する。 (x, y, z) は、平面ボード上のレーザ点群 p を示す。 R_{POS} はIMUの姿勢回転マトリックスを示し、 $(X_{POS}, Y_{POS}, Z_{POS})$ は、GNSS/IMUの位置座標を表す。また、 (x', y', z') はレーザスキャナのレーザ光が到達した位置の極座標である。そして、以下の

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R_{POS} \left(R_{Laser} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} X_{POS} \\ Y_{POS} \\ Z_{POS} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

2つは未知量である。 R_{Laser} はレーザスキャナの姿勢回転マトリックスを表し、 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ は IMU 原点からレーザスキャナまでの距離を表す。図- 4.3 に MMS-a, MMS-b および平面（ボード）の位置関係を示す。

ここで、MMS-a, MMS-b は独立したシステムとして稼働するため、MMS-a, MMS-b のセンサデータを相互に用いるためには、GNSS 時刻を用いたレーザ点群データの時刻を同期させる必要がある。しかし、一般的に MMS における GNSS 時刻すなわち 1Hz から 10Hz の計測間隔は、レーザスキャナの回転する 20Hz から 200Hz の間隔よりも数倍から 20 倍程度広い。そのため、GNSS とレーザスキャナの時刻はタイミングが完全に一致するとは限らない。そこで、GNSS 時刻の間隔の位置姿勢を次の様に内挿補間する。内挿式は、GNSS 時刻 $t_n \sim t_{n+1}$ の間にある時刻 t における MMS の位置、姿勢データを POS とするとき式 (4.2) のようになる。

$$POS_t = POS_n + \frac{t - t_n}{t_{n+1} - t_n} (POS_{n+1} - POS_n) \quad (4.2)$$

こうして内挿補間された MMS-a の位置姿勢データ及び式 (4.1) を用いて MMS-b のレーザ点群は 3 次元復元される。

次に、評価に用いる平面を算出する。平面を表す関数 F を式 (4.3) に示す。平面（ボード）は TS で計測した座標から平面の法線ベクトルを求める。また、式 (4.3) をモデルとした RANSAC 法により、地面や建物などをとらえた MMS-a のレーザ点群から求めた法線ベクトルを算出する。ここで (A, B, C) は、平面の法線ベクトルであり、 $p(x, y, z)$ は平面上の座標である。

点群を用いる場合は、平面付近の点を 1 点指定し、近傍に 100 点を抽出する。さらに、抽出した点群を用いて、ランダムに点を抽出し、法線ベクトルを求め、残り点の座標を代入し、点と平面との距離が閾値内にあるか評価し、評価が最も高い法線ベクトルをそれぞれの平面で求める。

$$F = Ax + By + Cz - 1 = 0 \quad (4.3)$$

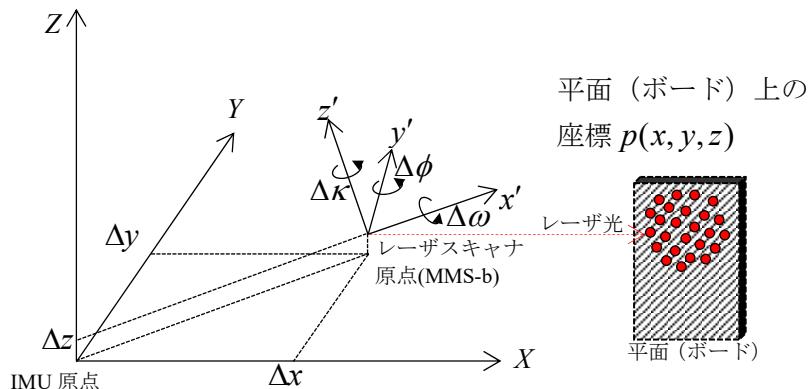


図- 4.3 2 台の MMS ユニットのセンサと平面の相対関係

これらのベクトルを用いて、外部標定要素の初期値を用いて3次元復元したMMS-bのレーザ点群と、式(4.4)で平面との距離 d 、式(4.5)のRMSを評価関数の初期値として求める。

$$d = \frac{|Ax + By + Cz - 1|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (4.4)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (4.5)$$

4.2.2 平面条件による外部標定要素の算出

式(4.3)は非線形の方程式であるが、それぞれの未知量について偏微分することで線形の方程式として表せる。まず、式(4.3)を x について偏微分し、これを式(4.6)の J_1 とする。

$$\begin{aligned} J_1 &= \frac{\partial F}{\partial \Delta x} = [A \ B \ C] \frac{\partial \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}}{\partial \Delta x} \\ &= [A \ B \ C] R_{POS} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [A \ B \ C] \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} = Aa_1 + Bb_1 + Cc_1 \end{aligned} \quad (4.6)$$

同様に J_2, J_3 については式(4.7)のようになる。

$$J_2 = \frac{\partial \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}}{\partial \Delta y} = Aa_2 + Bb_2 + Cc_2, \quad J_3 = \frac{\partial \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}}{\partial \Delta z} = Aa_3 + Bb_3 + Cc_3 \quad (4.7)$$

ここで、 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ は R_{POS} の要素であり、式(4.8)のようになる。

$$R_{POS} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} = R_\kappa \cdot R_\omega \cdot R_\phi$$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (4.8) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \kappa \cos \phi - \sin \kappa \sin \omega \sin \phi & -\sin \kappa \cos \omega & \cos \kappa \sin \phi + \sin \kappa \sin \omega \cos \phi \\ \sin \kappa \cos \phi + \cos \kappa \sin \omega \sin \phi & \cos \kappa \sin \omega & \sin \kappa \sin \phi - \cos \kappa \sin \omega \cos \phi \\ -\cos \omega \sin \phi & \sin \omega & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix} \end{aligned}$$

また、 R_{Laser} は式 (4.9) のようになる。

$$R_{Laser} = R_{\Delta\kappa} \cdot R_{\Delta\omega} \cdot R_{\Delta\phi}$$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} \cos \Delta\kappa & -\sin \Delta\kappa & 0 \\ \sin \Delta\kappa & \cos \Delta\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta\omega & -\sin \Delta\omega \\ 0 & \sin \Delta\omega & \cos \Delta\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Delta\phi & 0 & \sin \Delta\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Delta\phi & 0 & \cos \Delta\phi \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \Delta\kappa \cos \Delta\phi - \sin \Delta\kappa \sin \Delta\omega \sin \Delta\phi & -\sin \Delta\kappa \cos \Delta\omega & \cos \Delta\kappa \sin \Delta\phi + \sin \Delta\kappa \sin \Delta\omega \cos \Delta\phi \\ \sin \Delta\kappa \cos \Delta\phi + \cos \Delta\kappa \sin \Delta\omega \sin \Delta\phi & \cos \Delta\kappa \sin \Delta\omega & \sin \Delta\kappa \sin \Delta\phi - \cos \Delta\kappa \sin \Delta\omega \cos \Delta\phi \\ -\cos \Delta\omega \sin \Delta\phi & \sin \Delta\omega & \cos \Delta\omega \cos \Delta\phi \end{bmatrix} \quad (4.9) \end{aligned}$$

次に、式 (4.3) を $\Delta\kappa$ について偏微分し、これを式 (4.10) の J_4 とする。

$$\begin{aligned} J_4 &= [A \ B \ C] \frac{\partial \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}}{\partial \Delta\kappa} \quad (4.10) \\ &= [A \ B \ C] R_{POS} \left(\frac{\partial R_{Laser}}{\partial \Delta\kappa} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + 0 \right) + 0 = [A \ B \ C] \left(R_{POS} \cdot R'_{\Delta\kappa} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \right) \end{aligned}$$

ここで、 $\frac{\partial R_{Laser}}{\partial \Delta\kappa}$ は $R'_{\Delta\kappa}$ で表す式 (4.11) のようになる。

$$\frac{\partial R_{Laser}}{\partial \Delta\kappa} = \begin{bmatrix} -\sin \Delta\kappa & -\cos \Delta\kappa & 0 \\ \cos \Delta\kappa & -\sin \Delta\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot R_{\Delta\omega} \cdot R_{\Delta\phi} \quad (4.11)$$

また、式 (4.3) を $\Delta\omega, \Delta\phi$ について偏微分し、これを式 (4.12) の J_5, J_6 とする。

$$J_5 = \frac{\partial \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}}{\partial \Delta\omega} = [A \quad B \quad C] \left(R_{POS} \cdot R'_{\Delta\omega} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \right) \quad (4.12)$$

$$J_6 = \frac{\partial \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}}{\partial \Delta\phi} = [A \quad B \quad C] \left(R_{POS} \cdot R'_{\Delta\phi} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \right)$$

式 (4.3) を平面条件とし、1点についての補正量 V_F 、初期値 F とヤコビ行列を用いた方程式は式 (4.13) になる。

$$V_F = J \cdot D - F = [J_1 \quad J_2 \quad J_3 \quad J_4 \quad J_5 \quad J_6] \begin{bmatrix} \nabla x \\ \nabla y \\ \nabla z \\ \nabla \kappa \\ \nabla \omega \\ \nabla \phi \end{bmatrix} - F \quad (4.13)$$

ここで、 n 点についてのヤコビ行列 J を式 (4.14) に表す。

$$J = \begin{bmatrix} J_1^1 & J_2^1 & J_3^1 & J_4^1 & J_5^1 & J_6^1 \\ J_1^2 & J_2^2 & J_3^2 & J_4^2 & J_5^2 & J_6^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ J_1^n & J_2^n & J_3^n & J_4^n & J_5^n & J_6^n \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} \nabla x \\ \nabla y \\ \nabla z \\ \nabla \kappa \\ \nabla \omega \\ \nabla \phi \end{bmatrix}, \quad \bar{F} = \begin{bmatrix} F^1 \\ F^2 \\ \vdots \\ F^n \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

n 個の観測点で、以上を式 (4.15) のように展開する。

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n J_1^i J_1^i & \cdots & \sum_{i=1}^n J_1^i J_6^i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n J_6^i J_1^i & \cdots & \sum_{i=1}^n J_6^i J_6^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nabla x \\ \nabla y \\ \nabla z \\ \nabla \kappa \\ \nabla \omega \\ \nabla \phi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n J_1^i F^i \\ \sum_{i=1}^n J_2^i F^i \\ \sum_{i=1}^n J_3^i F^i \\ \sum_{i=1}^n J_4^i F^i \\ \sum_{i=1}^n J_5^i F^i \\ \sum_{i=1}^n J_6^i F^i \end{bmatrix} = 0 \quad (4.15)$$

式 (4.13) の省略形は式 (4.16) のような正規方程式に省略できる。

$$J^T J \cdot D - J^T \bar{F} = 0 \quad (4.16)$$

この展開式は、線形の方程式となり、最小二乗法の解として、未知量 D ($\nabla x, \nabla y, \nabla z, \nabla \kappa, \nabla \omega, \nabla \phi$) は ($\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \kappa, \Delta \omega, \Delta \phi$) の增量として求めるものとする。

4.2.3 外部標定要素で生成した点群と平面との平均距離の評価

4.2.2 により求められた未知量 D を用いて、4.2.1 で抽出したレーザ点群を再び式 (4.1) を用いて 3 次元復元する。そのレーザ点群について、式 (4.4) を用いて 4.2.1 の平面との距離を各点について求め、RMS (Root Mean Square) で評価する。

4.2.4 評価関数による LM 法の係数の更新

この評価関数を用いて、LM 法を適用する。未知量 D に単位行列 I と係数 λ を入れて置き換える。

ると式 (4.17) のようになる.

$$(J^T J + \lambda I) D - J^T \bar{F} = 0 \quad (4.17)$$

LM 法は、式 (4.18) のように評価関数の結果に応じて λ の値を増減させる。例えば、各点と平面との残差の RMS が小さくなる時、 λ に $1/10$ を乗じて代入し、大きくなる時は λ に 10 を乗じて代入して、4.2.2 の計算処理を繰り返す。そして、評価関数が十分小さな値を取るように収束した未知量 D をキャリブレーションパラメータとして求めるものとする。

$$\begin{aligned} RMS_{new} &\leq RMS_{old}, \quad \lambda \times \frac{1}{10} \\ RMS_{new} &> RMS_{old}, \quad \lambda \times 10 \end{aligned} \quad (4.18)$$

4.3 キャリブレーションボードと平面を用いた実験

本章で提案する手法の効果を確認するため、2台のMMSユニットを軌陸車に搭載し、線路上を走行して計測を行う。MMS機材の状態と位置関係を図-4.4に示す。2台のMMSユニットの位置関係は、計算時の初期値に用いるため、それぞれIMU原点間の座標をTSで観測して求める。

4.3.1 点群データ取得

MMSはLeica Geosystems社製のPegasus Twoを2台使用する。実験場所は図-4.5に示すように、兵庫県神戸市の（株）レンタルのニッケン神戸営業所の軌陸機械点検場内にある試験線路を使用する。キャリブレーション場所は、30m×10m程度のスペースを用いる。合計9枚の平面（ボード）を長手方向に左右に配置する。2か所の踏切（NおよびS）には精度確認のためにターゲットボードを進行方向に対して、鉛直、平行、角度を45°開いた状態で設置する。平面（ボード）およびターゲットボードは、TSで観測し平面直角座標を取得する。キャリブレーション場所を移動計測の後、踏切から載線し、曲線区間と直線区間を移動計測する。

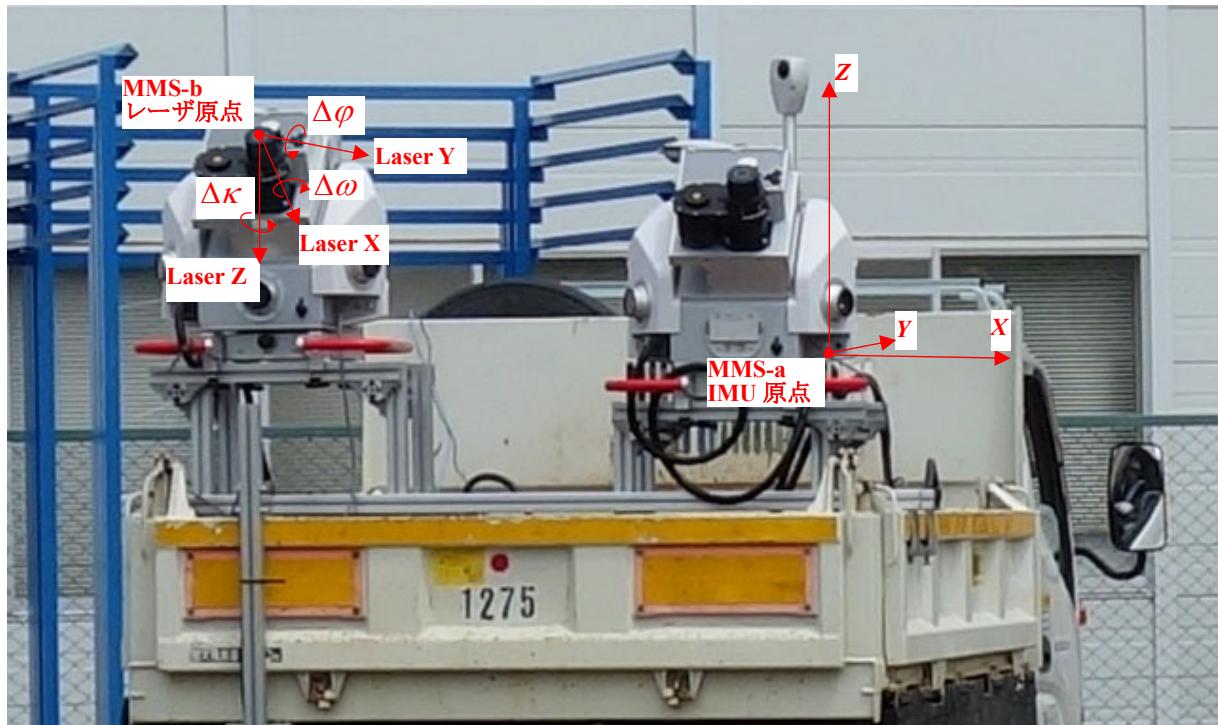


図-4.4 MMS機材の搭載状態とIMUとレーザの原点の位置関係

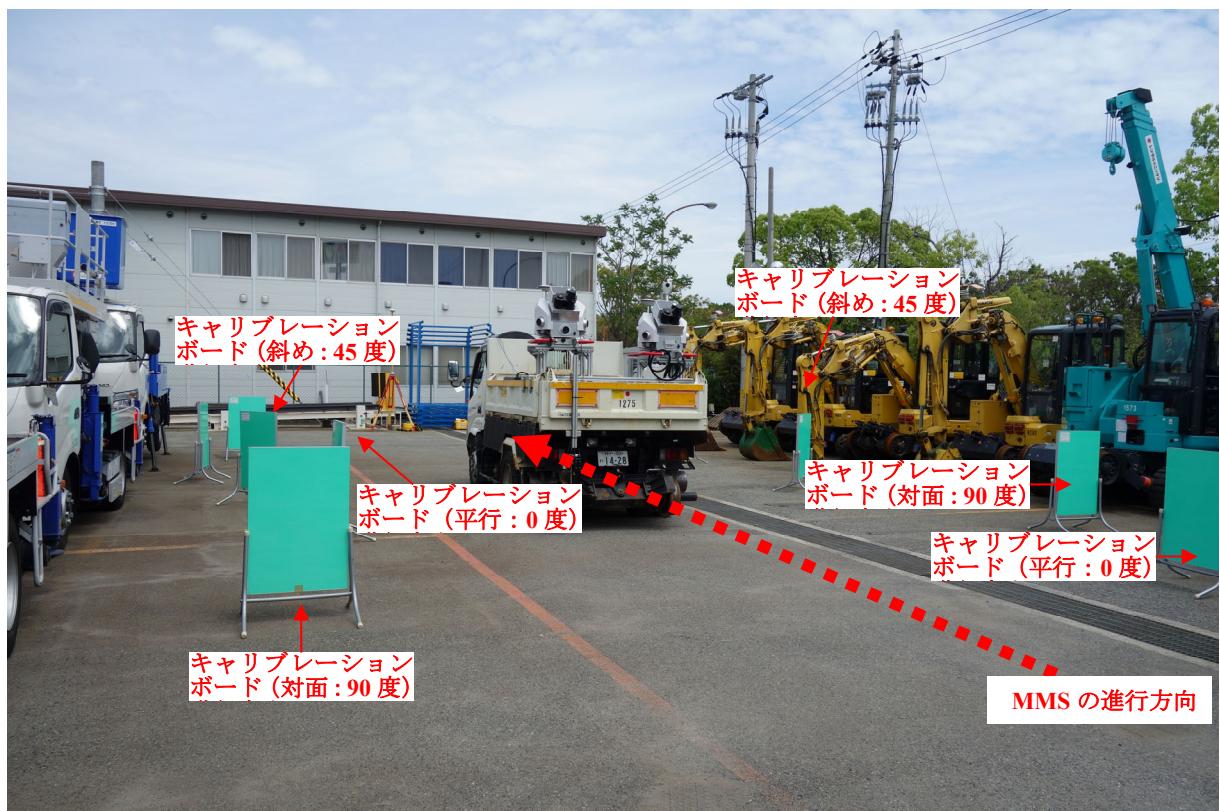


図-4.5 実験場所概観（左上）と平面（ボード）測定（右上） キャリブレーションボード配置（下）

4.3.2 データ解析処理

MMS 計測で取得したデータファイルは、MMS-a については位置姿勢データとレーザスキャナデータ、MMS-b についてはレーザスキャナデータの解析処理を行う。まず、MMS-a の位置姿勢データは、国土地理院の電子基準点を用いて、RTK (Real Time Kinematic) -GNSS 解析⁵⁰⁾ を行う。

次に、MMS-a のレーザスキャナデータは MMS に付属する後処理ソフトウェアで 3 次元復元処理を行う。また、MMS-b のレーザスキャナデータは提案手法により 3 次元復元処理を行うものとする。

4.3.3 提案手法でのキャリブレーション

提案手法で外部標定要素を計算する。図-4.6 に計算処理フローを示す。まず、TS 成果と MMS-a のレーザ点群から評価計算に用いる平面計算を行う。つぎに、TS 計測と製造出荷時の姿勢パラメータから外部標定要素の初期値とする。続いて、MMS-a の GNSS/IMU データと MMS-b のレーザ点群の時間調整のための内挿計算をする。その結果、初期値、内挿計算済みの GNSS/IMU データを用いた 3 次元復元計算処理を行い、レーザ点群の座標データが生成することが可能となる。

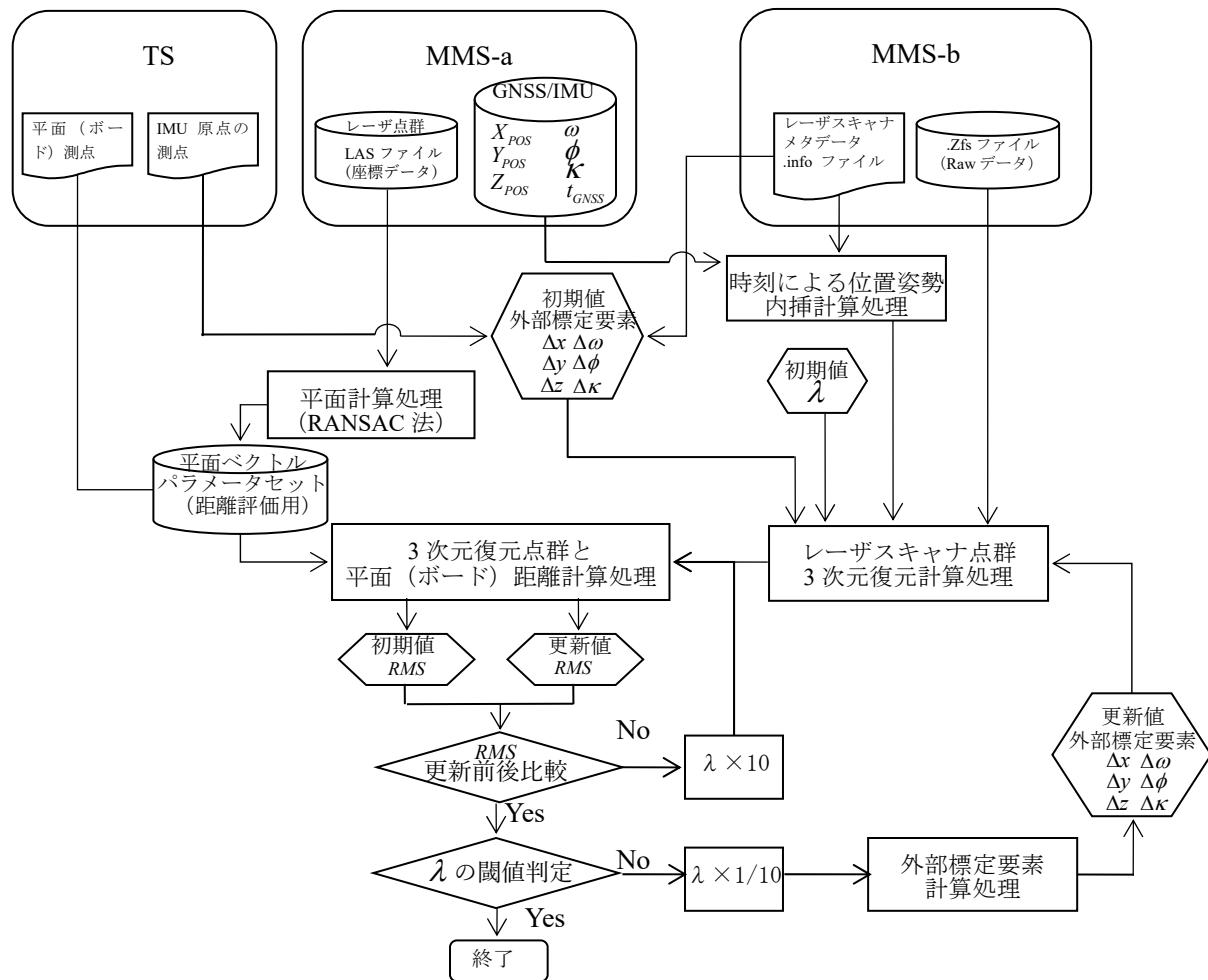


図-4.6 提案手法による計算処理フロー

このように、初期値から生成されたレーザ点群の座標は、求めた平面近傍 100 点程度について評価用の平面ベクトルから距離を計算する。これらの距離について、 RMS を求め、初期値を求める。 RMS が初期値の段階では、LM 法に適用する係数 λ の値は 1 とし、外部標定要素の計算処理を式 (4.6) ~ 式 (4.16) を用いて計算する。

求められた外部標定要素が初期値から更新される。再び、更新値を使用し MMS-b のレーザスキャナ点群の 3 次元復元計算処理を行う。この流れを繰り返し、点群と平面の距離の RMS 値を更新しながら、LM 法の係数 λ が閾値より小さな値となるまで、外部標定要素の計算処理、更新値からの 3 次元復元計算処理を繰り返す。ここで、係数 λ の閾値は計算の繰り返し回数の増減にかかるため、任意設定とした。

4.3.4 キャリブレーション結果の確認

4.3.3 までに得られた、最終的に更新された外部標定要素を使用し、線路を走行した MMS-a, MMS-b のデータを用いて確認する。確認は、踏切付近に設置された測量用のターゲットボードと、レール面での較差を比較して行う。

4.4 実験結果と考察

2台のMMSユニットで取得したデータを用いて、提案手法を適用してキャリブレーションを行った。キャリブレーション場所の平面（ボード）と抽出した点群を重ね合わせた表示を図-4.7に示す。平面上の1点を指定して、近傍の100点を抽出した。キャリブレーション場所で、TSにより観測された9枚の平面（ボード）以外に、MMS-aの点群から地面や、近辺の建物の壁面から31平面を追加した。MMS-bより抽出した平面との距離についてのRMSを求めた。抽出した点群の全点について平面との距離を求め、その面に対してのRMSを求めた。RMSは5回程度繰り返し計算され、最終的には平均0.003m程度に収束した。図-4.8に最終的に更新されたRMSとその直前のRMSの値をグラフで示す。



図-4.7 平面（ボード）と点群

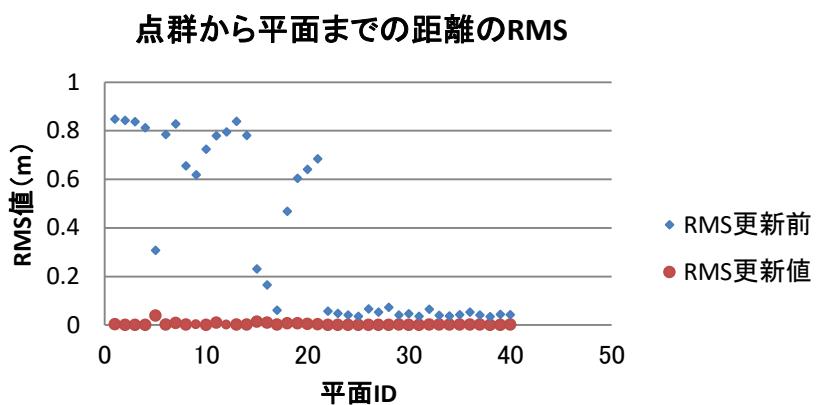


図-4.8 最終更新されたRMSと直前のRMS

RMS が十分に小さくなつて、計算処理が終了した結果、得られたレーザスキャナの外部標定要素を計算の初回段階での値と合わせて表- 4.1 に示す。

良好な平面を用いる場合、5回から6回の繰り返す計算回数が多いことから、実際の計算処理では λ の閾値を0.00015とした。その結果、繰り返し計算は5回で終了した。計算処理に要した時間は、計測距離が短かったことから15分以内であった。

こうして求めた外部標定要素を用いて、MMS-bについて再度3次元復元した。MMS-aとの残差を測量用のターゲットボードで比較した。その結果を表- 4.2 に示す。踏切Nは、直線区間と曲線区間の間にあるため、ターゲットの面と、MMS-aおよびMMS-bとの距離が直線区間と曲線区間で異なる。そのため、踏切Sのターゲットボードの点群は、常に同じ方向からレーザ照射されたものであることにに対して、踏切Nの点群は、ターゲットボードの表と裏の両面に対して照射された点群である。用いたターゲットボードは、アルミ製で厚さは1mm程度であり、円形に十字状に黒色と無地に塗り分け、中心点を対称に4分割されていた。そのため、踏切Nについては、ボードの厚みと鏡面反射の影響から水平方向に読み取り誤差が発生し、残差が若干劣化した。しかし、最大の標準偏差でも0.005mであったことから、鉄道建築限界管理に要求される精度である0.01m以内を実現することができたといえる。

表- 4.1 レーザスキャナの外部標定要素の計算結果

単位 (m), ($^{\circ}$)

外部標定要素	Δx	Δy	Δz	$\Delta \kappa$	$\Delta \omega$	$\Delta \varphi$	距離(RMS)
初期値	0.0802	-0.4561	0.3239	-0.66852	-50.2302	-0.38196	0.4786
更新値	1.1979	-0.4519	0.2252	3.166328	-51.8916	0.71617	0.0072

表- 4.2 測量用ターゲットボードを用いた残差

単位 (m)

ターゲット(面)	項目	X	Y	X,Y(水平位置)	Z(標高値)
踏切N	標準偏差	0.000	-0.001	0.005	-0.001
	平均	0.003	0.005	0.001	0.002
踏切S	標準偏差	0.000	0.002	0.004	-0.001
	平均	0.003	0.003	0.001	0.001

また、2台のMMSのレーザスキャナを整合し、重ね合わせた実際のレールの段面図を図-4.9に示す。直線区間では、レール頭部やレール底部の点群がほとんど同じ位置に表れている。しかし、曲線区間の断面図では、0.003mではあるがMMS-bのレール頭部に格差が生じている。このことは、高さ方向のキャリブレーション精度が不足していることを示す。姿勢角の内、ピッチ角($\Delta\omega$)とロール角($\Delta\varphi$)の精度が不足している可能性がある。実験では、路面はアスファルト舗装を面としてとらえることができると仮定した。しかし、舗装面には小さな窪みや、骨材が抜けた微小な穴があることから、抽出したレーザ点群からの平面評価計算の精度が、平面(ボード)からの計算精度よりも劣っていた可能性がある。対処する方法として、地面に垂直に立てた平面(ボード)の水平角度を変えて並べるだけでなく、天井方向に平面(ボード)を配置することで、ピッチ角($\Delta\omega$)とロール角($\Delta\varphi$)に影響する平面評価計算の精度向上を見込むことができる。そのため、設置の簡便性を考慮する範囲において、平面(ボード)の地面と高所への設置が検討課題となる。

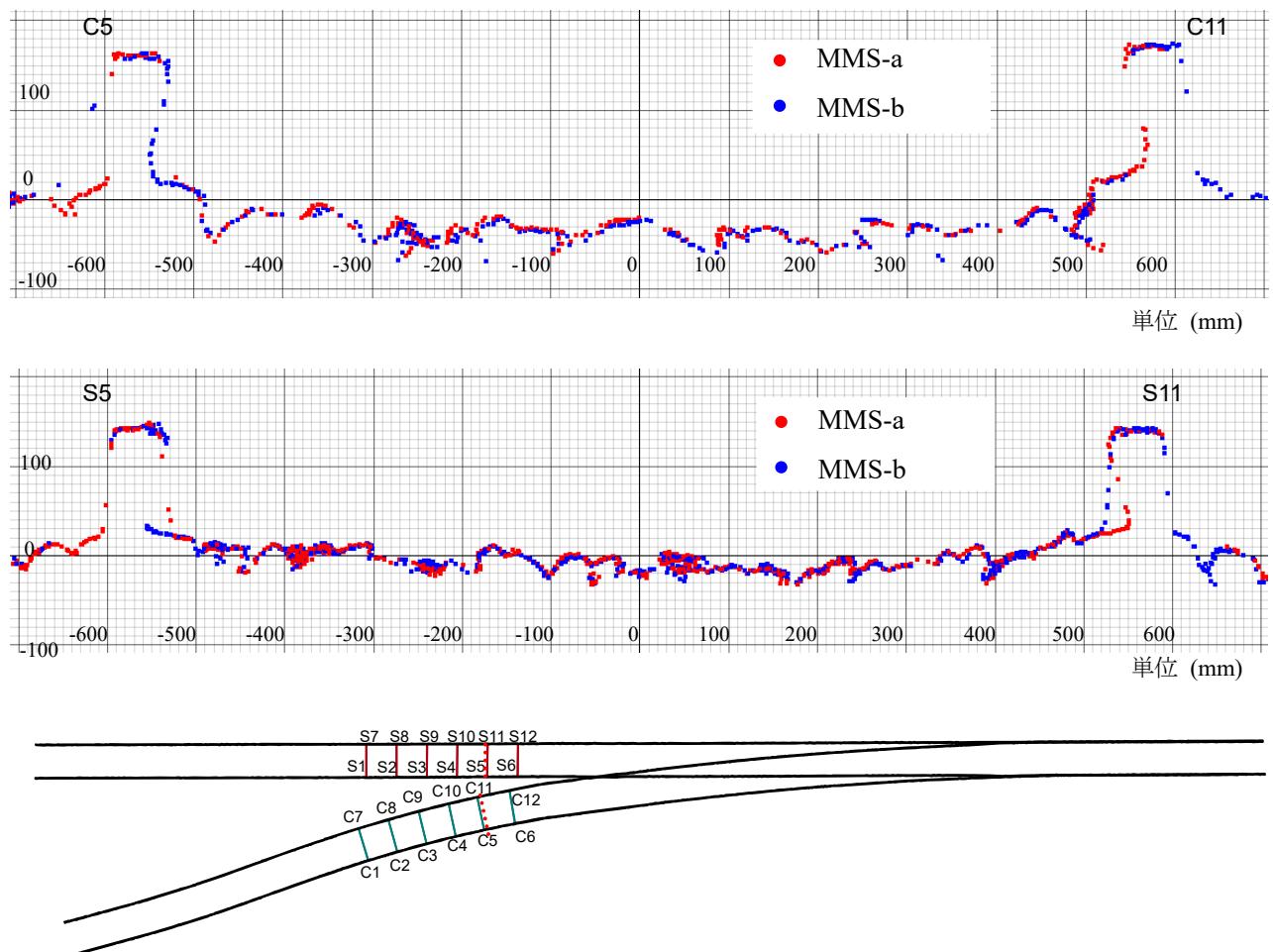


図-4.9 曲線区間（上）と直線区間（下）での整合の状況を示す断面図

4.5 まとめ

本章では、2台のMMSのレーザ点群データの整合処理時間を短縮することを目的として、1台の位置姿勢情報を利用して、もう1台のMMSに装着されているレーザスキャナについての外部標定要素（センサ位置と3軸の傾き）をキャリブレーションして求めた。外部標定要素を求める計算方法には、初期値の乖離に対応するため、非線形の最小二乗法のLM法を適用した。実際に試験線路を走行して計測を行い、2台のMMSのレーザ点群データ整合性を検証した結果、最大で0.005mの較差となった。これは、第3章の実験結果で、支障物の位置が左右で最大0.015mの格差があったことに対して、位置精度の向上が期待できる結果である。また、キャリブレーションに要する時間は、一般的なレーザ点群処理ソフトを用い、手作業で繰り返し計算する場合は4時間から8時間かかることに対して、計測時間と計算処理時間を合わせ、2時間程度であった。このことにより、効率的に2台のMMSのレーザ点群を整合して、計測成果を利用することが可能となった。今後は、高さ方向の精度向上の実現のための平面（ボード）の配置や、作業時間の短縮などに取り組む。実際の鉄道工事作業現場での環境に合わせ、実用化を目指す。

第5章 2台のレール直上レーザスキャナによる分岐器トングレールの変状把握の検証

5.1 本章の概要

列車の安全な運行のためには、線路の維持管理が重要であり、その中でも保線にかかる費用は大きな比率を占める。鉄道事業者は省令に従い、線路を設定値内にあるか調べるために定期的に測定する。しかし、従来の軌道測定方法は、時間がかかり、労働集約的で、エラーが発生しやすい傾向があった。

こうした現状を改善するためには、レールの3次元形状を非接触の計測機器で自動的に測定することが重要である。近年は、鉄道を移動してレーザスキャナで3次元計測する手法を試み始められている。しかし、主に、線路線形の測定を目的としており、レールの形状の変状を計測することには用いられていない。それは、軌間中心からレーザを照射した点群データは、軌間中心側のレールの側面の形状をとらえるが、外側の側面は捉えられず、レール形状を評価することが困難であった。平面交差する区間では、分岐器を構成するレールの形状が複雑になるためである。さらに、車輪を他の線路に切り替えるポイント部の先端部品（トングレール）の厚さが薄く、基本レール（ストックレール）に近いため、軌間中心に位置するレーザスキャナでレーザ点群データを取得することはできない。

トングレールの変状は脱線の原因となるため、位置と形状を効率的かつ迅速に高い精度で測定する必要がある。本章では、レールの真上にある2台のMMSを使用した新しいトングレールの測定方法を提案する。2台のMMSユニットのレーザスキャナがレールの真上に設置され、トングレールを両側から計測することが可能である。図-5.1に2台のレール直上レーザスキャナとトングレールの位置を示す。

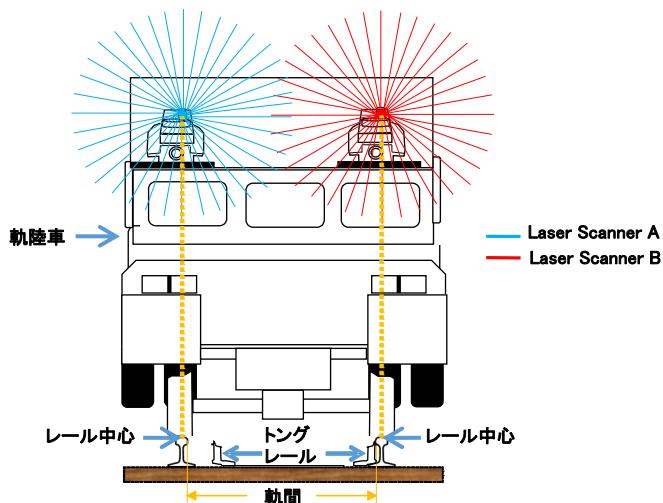


図-5.1 軌陸車荷台後部に並列した2台のレール直上レーザスキャナとトングレールの位置

さらに、第3章に示したように、1台のMMSによる測定方法に比較して、迅速に高精度な点群データを取得可能であった。レール直上の2台のMMSユニット取得された点群データは、軌間中心線の位置を用いて高精度に整合させることができる。従って、トングレールの形状を高精度に3次元復元することが可能である。

この方法を検証するため、実際のレールを走行し、分岐器を移動取得した。分岐器の構造を図-5.2に示す。MMSの点群データは、TLSによって収集された点群データと比較した。実験の結果、トングレールの位置は、幅で0.002mの精度、高さで0.003mの精度で取得できた。結論として、提案された方法は、特にトングレールの位置で、従来の方法よりも良い結果を生み出すといえる。

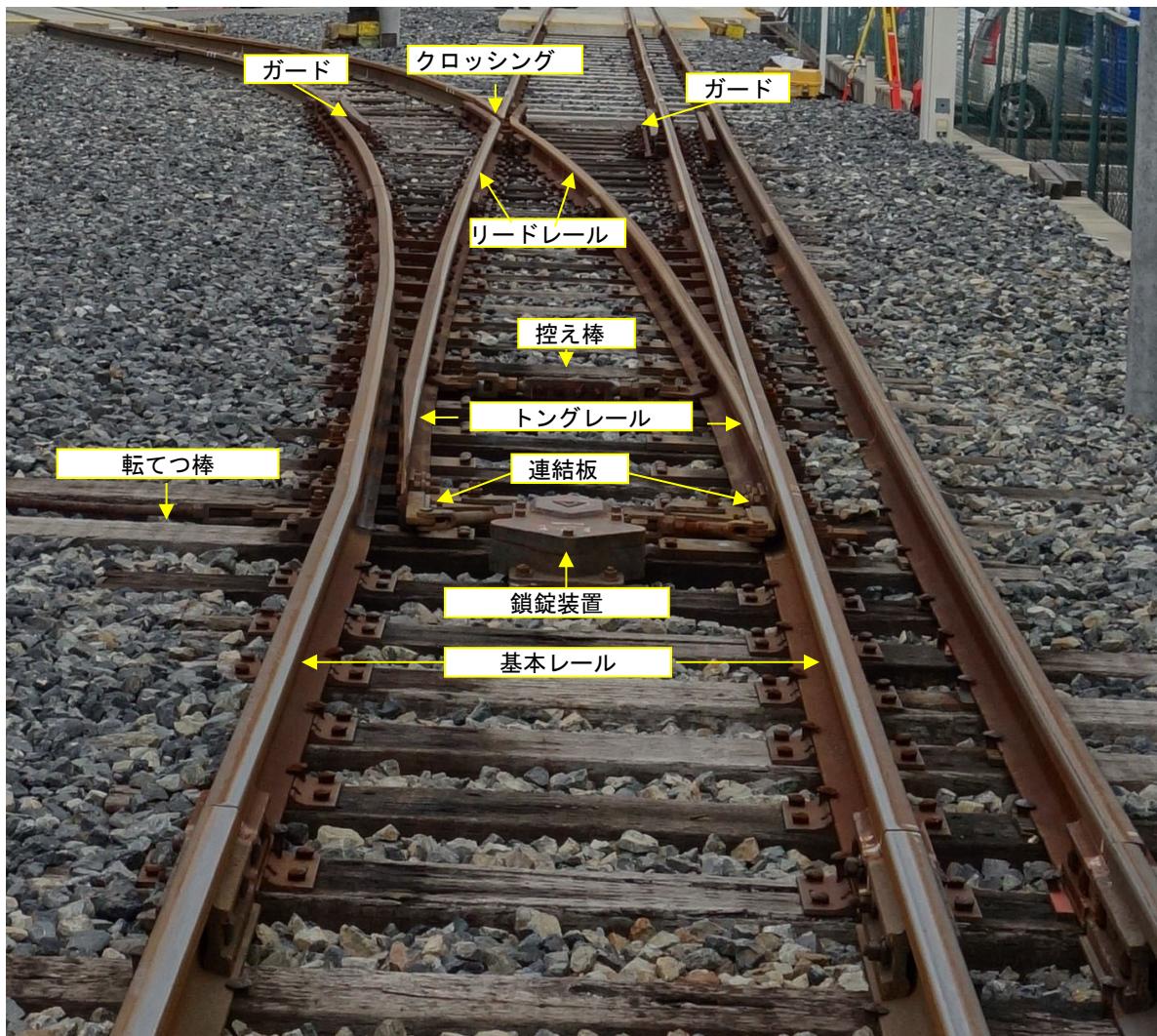


図-5.2 分岐器の構造

5.2 2台のレール直上レーザスキャナの分岐器の変状把握手法

本提案は、レール直上に設置した2台のMMSのレーザ点群データから軌間中心線をそれぞれ求め、求めた軌間中心線を合成することで、2台のMMSユニットの点群データを整合する手法から、分岐器のトングレール部分の形状を3次元復元する手法である。図-5.3に提案手法のフローを示す。第3章の提案手法における2台のMMSユニットの点群データを整合する手法に加え、トングレール形状の3次元復元表示を行い、形状を計測する。具体的には、トングレールの形状は高さ、幅の他、密着する基本レールとの比高を計測する。

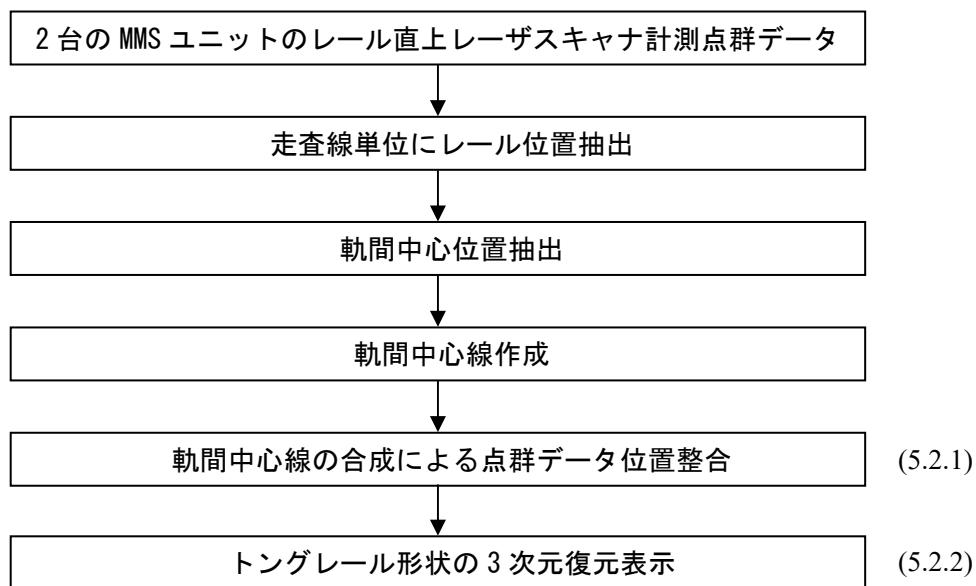


図-5.3 トングレール形状の3次元復元手法のフロー

5.2.1 2台のMMSユニットの点群データを整合する手法

第3章の本提案手法では、2台のレール直上レーザスキャナを構成するMMSのレーザ点群データは、それぞれのGNSS/IMUの座標値と傾きにより、3次元復元される。本章でも同様に走査線単位で反射強度を用いた重み付け平均でレールの位置を取得し、軌間中心位置を算出の上、軌間中心線を生成する。さらに、2台のMMSユニットそれぞれの軌間中心線を用いた整合を行う。

ここで、図-5.4に分岐器通過時のレーザ照射とトングレールの位置関係を示す。レーザ点群データを移動取得中に分岐器上を通過するとき、対象となるトングレールは、基本レールから離れなければ変状を把握できない。すなわち、このトングレールから離れている基本レールの直上のレーザスキャナが、最も近い位置の基本レール直上からトングレールの側面を照射し、レーザ点群データを取得することになる。従って、トングレールから離れている基本レールの直上有るレーザスキャナのレーザ点群データから求めた軌間中心線に対する差分を算出し、差分量から移動量のベクトルを求め、基本レール直上のMMSユニットのレーザ点群データに対して整合することとする。

5.2.2 トングレール形状の3次元復元表示

整合した点群データは、各レーザスキャナに分けて、3次元ビューワ上に色分け表示する。トングレールのレーザ点群データを表示して、縦断面、横断面を任意の位置で表示して計測する。ここで、縦断面に表示する厚みはトングレールの曲率に応じて調整が可能とする。縦断面表示の奥行方向の基本レールを表す点群データとの重複を避けるためである。また、断面表示において、計測部分における長手方向に鉛直となるように角度を調整し表示する。

連続して計測されたトングレールの幅や、高さを計測し、形状に変状がないか確認することとする。

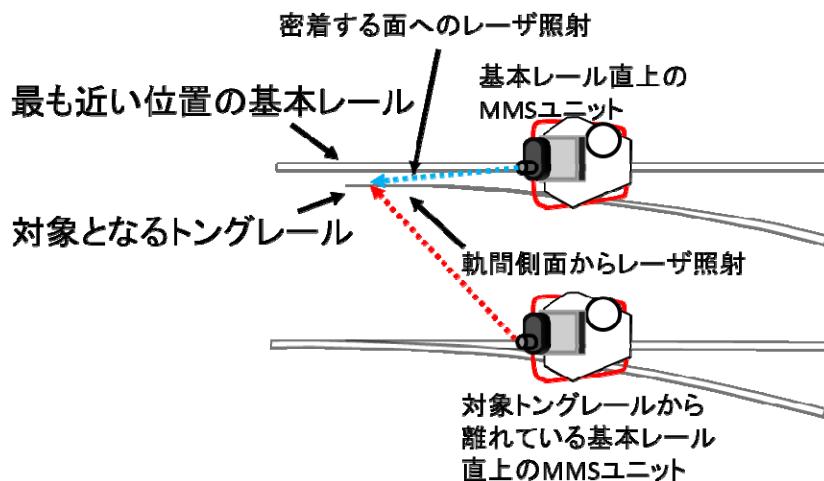


図-5.4 分岐器通過時のレーザ照射とトングレールの位置関係

5.3 実験と評価

本章では、第3章においてレール直上に配置したレーザスキャナにより取得された点群データを用いた分岐器トングレールの変状把握手法の妥当性を検証するため、TLSによるレール形状計測値と、提案手法により取得されたトングレールの幅、高さの値を比較した。図-5.5に実験場所における線路上の分岐器トングレールの配置を示す。線路上には、片開き分岐器があり、南から北に対向(Facing)、北から南に背向(Trailing)となる。トングレール(Point Blades)は分岐器の南側に位置する。

5.3.1 実験に使用するデータ

実験には、図-5.1に示した軌陸車荷台後部にMMSユニットを並列にレール直上に搭載して移動取得したパターン(以降、RP: Rear in Parallel)に加え、図-5.6のように軌陸車の運転室屋根左側、荷台後部右側かつレール直上に配置して移動取得した点群データ(以降、FR: Front and Rear)を用いた。使用するMMSユニットのレーザスキャナは地面に対する入射角が50°であるため、RPの場合は、トングレール左右側面の点群データは平行となる。一方FRの場合は、左右の側面の点群データは反対方向に交差する。トングレールの変状を把握するために点群データの並び方によって位置精度に差異がないか比較をした。

取得したレーザは第3章に提案した手法により、レーザ点群データを用いて、走査線ごとに、レールのパラメータを用いて軌間中心位置を解析し軌間中心線を求めた。それぞれの移動ケースごとに、各MMSユニットの軌間中心線から移動量をもとめ点群データを整合させた。

RPの場合は第3章の提案手法で、軌間中心位置のGNSS時刻を比較し、1000分の5秒単位の時刻差がある場合は内挿補間した位置からの移動ベクトルを求め、走査線ごとに平行移動した。一方、FRの場合は、同時刻の軌間中心位置は10.5m離れている。そのため、同距離を軌間中心線上に沿って移動した軌間中心点との移動ベクトルを求める必要がある。直線ではレーザスキャナとレールの距離は変化しないため、移動ベクトルを求める軌間中心位置を特定することができる。しかし、第3章で考察したように、曲線部分の入り口で外側のレール位置は、レーザの照射中心位置がレールの直上から軌間側に0.02m程度ずれる。その結果、曲線レールの形状測定は、直線に比べ高さが0.002m程度劣化した。つまり、曲線区間における軌間中心線位置の計測精度は直線に比べ、精度が劣る可能性がある。そのため、FRのパターンでは、10.5mの照射位置の距離の差が、曲線区間において影響がないか、目視で確認の上で整合を行った。直線区間から曲線のレールを計測した場合、曲線区間から直線区間を計測した場合について点検した。点検した結果、同じGNSS時刻の軌間中心点から軌間中心線を10.5m戻った位置で移動ベクトルを求め、点群データを整合し、トングレールの変状把握のために問題のある場所は見当たらなかった。

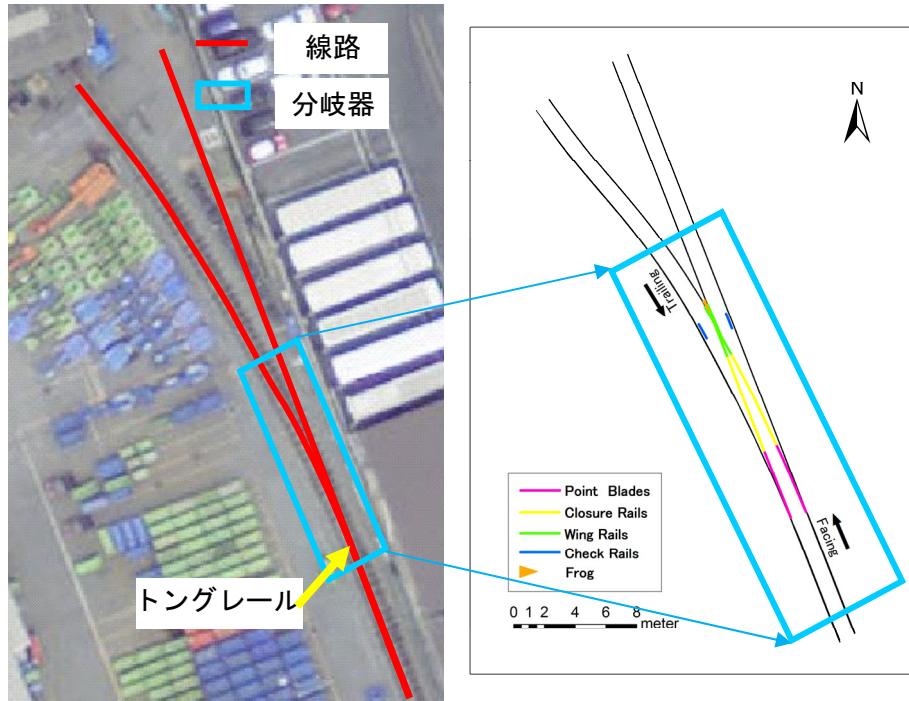


図- 5.5 実験線路における分岐器位置（左）と分岐器レール配置図（右）

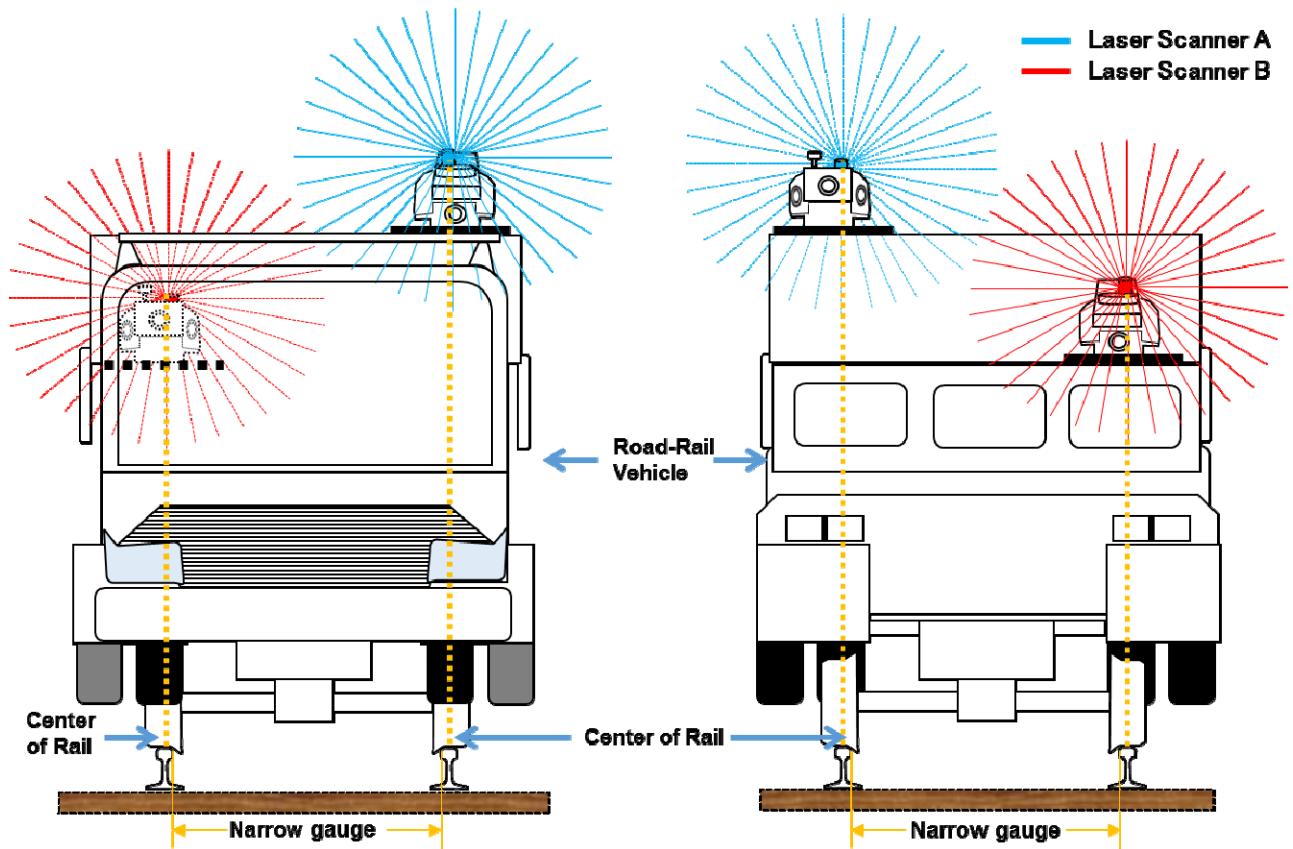


図- 5.6 軌陸車運転室屋根と荷台後部（FR）に配置したレール直上レーザスキャナ

5.3.2 トングレールのレーザ点群データの定性的比較

提案手法について、有用性を確認するために、整合させたレーザ点群データを TLS で取得した点群データをトングレールの先端部の取得形状を比較する。図-5.7、図-5.8 に分岐器トングレール先端付近のモデルと TLS の点群データについて正射投影図と縦断図を示す。

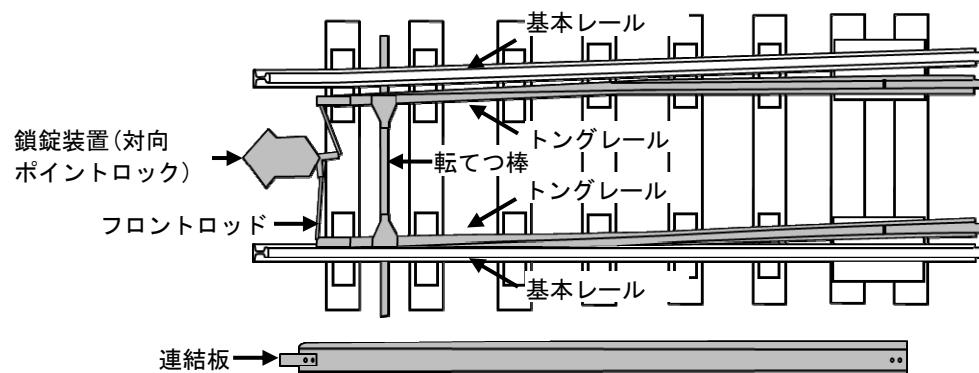


図-5.7 分岐器トングレール先端（正射投影：上段、縦断表示：下段）

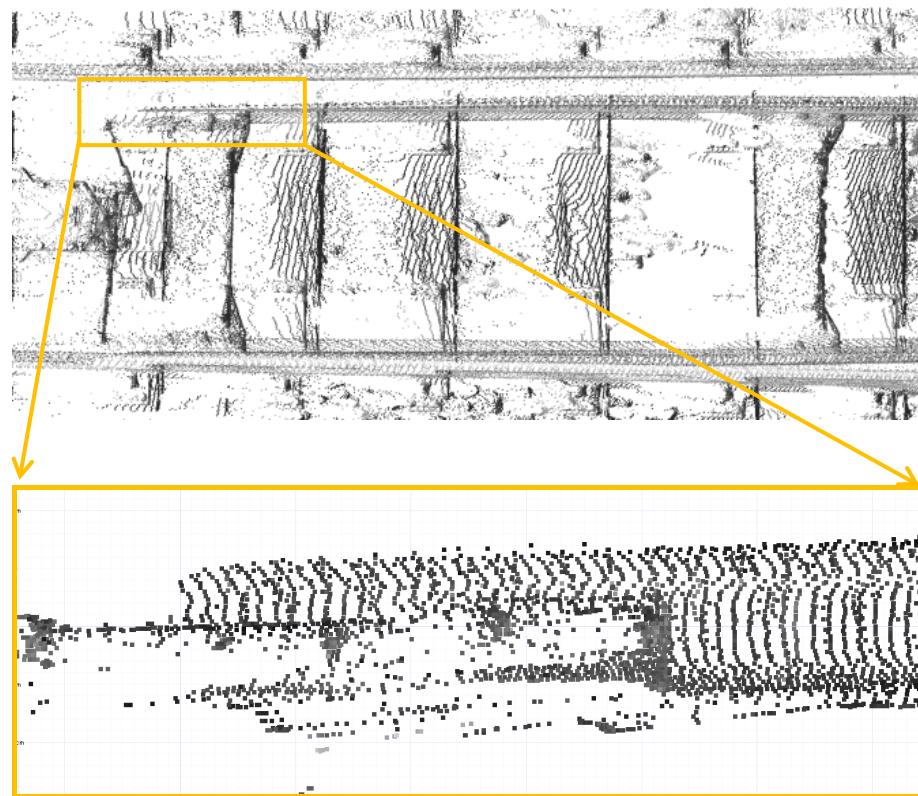


図-5.8 TLS による分岐器トングレール先端の点群データ（正射投影：上段、縦断表示：下段）

モデルに示したように、転てつ棒、対向ポイントロックやフロントロッドを介して、トングレールの部分基本レールに密着させ、図下方の基本レールにトングレールが密着した状態を表している。一方、TLSの点群データは、正射投影された上段では、ほぼ正確な分岐器の形状が再現されているが、下段の拡大表示では、連結板の位置とフロントロッドとの取り付け金具の詳細さが再現できていない。しかし、トングレール本体は十分に高密度かつ高精度に計測されておいることがわかる。従って、このTLSの点群データを本章における評価基準とする。

2台のレール直上のレーザスキャナでFRおよびRPのパターンで取得した点群データについて、本章の提案手法に従って分岐器トングレールの3次元復元処理を行った。FR及びRPの計測パターン別に正射投影表示と縦断表示を図-5.9、図-5.10に示す。TLSとFR、RPの計測パターンのレーザ点群データを定性的に比較する。まず、すべてのレーザ点群データはトングレールの上端部について、ビューワーソフトによる机上計測のために十分な形状をとらえている。次に、トングレールの先端部については、FRのパターンのみが直線的に先端形状をとらえている。一方、TLS、RPの先端部分は直線的には点群データが並んでいない。これは、FRではどちらかのレーザが先端部の角の入射角が小さい状態で照射できた一方で、RRはどちらのレーザ照射も先端部の角で、入射角が拡大するため、レーザ点群が正しい位置ではなくなるためと考えられる。

また、FR、RPの両パターンはTLSの点群データよりも、トングレール付近での点密度が多く均一に表示される。TLSが斜距離で2mから10mの距離で計測されることに比較して、レールの直上に設置されるとレール頭部からの距離が一定となり、レーザスキャナ2台分の点群が等間隔に並ぶため、3次元形状の把握が容易である。

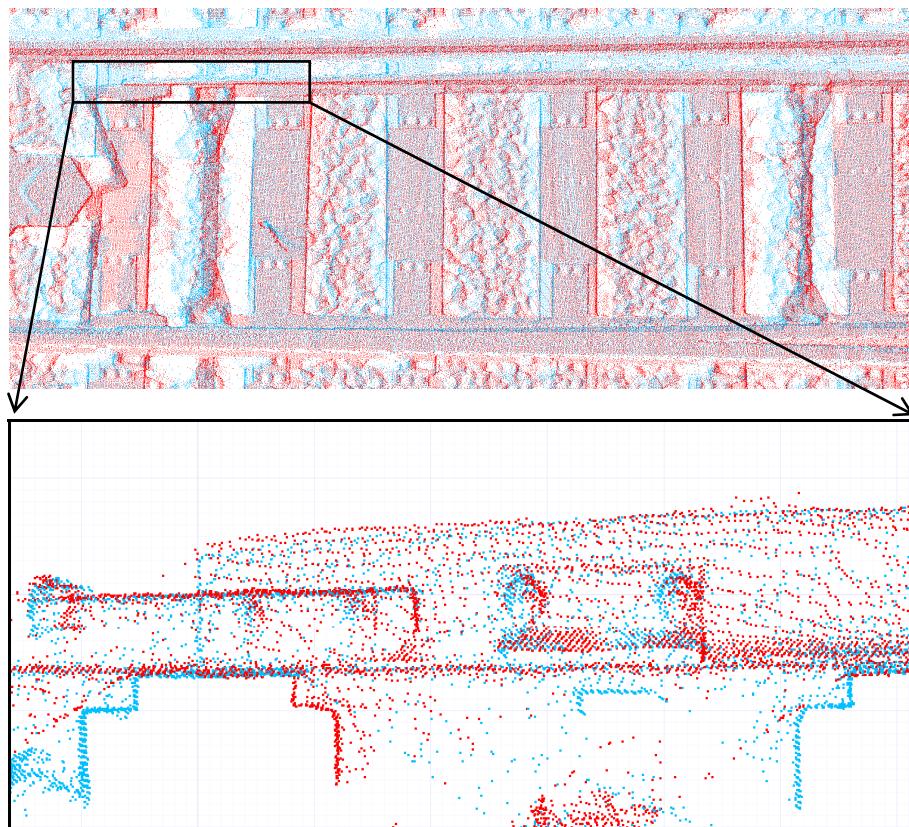


図-5.9 FRパターンでの2台のレール直上レーザスキャナによる
分岐器トングレール先端の点群データ（正射投影：上段、縦断表示：下段）

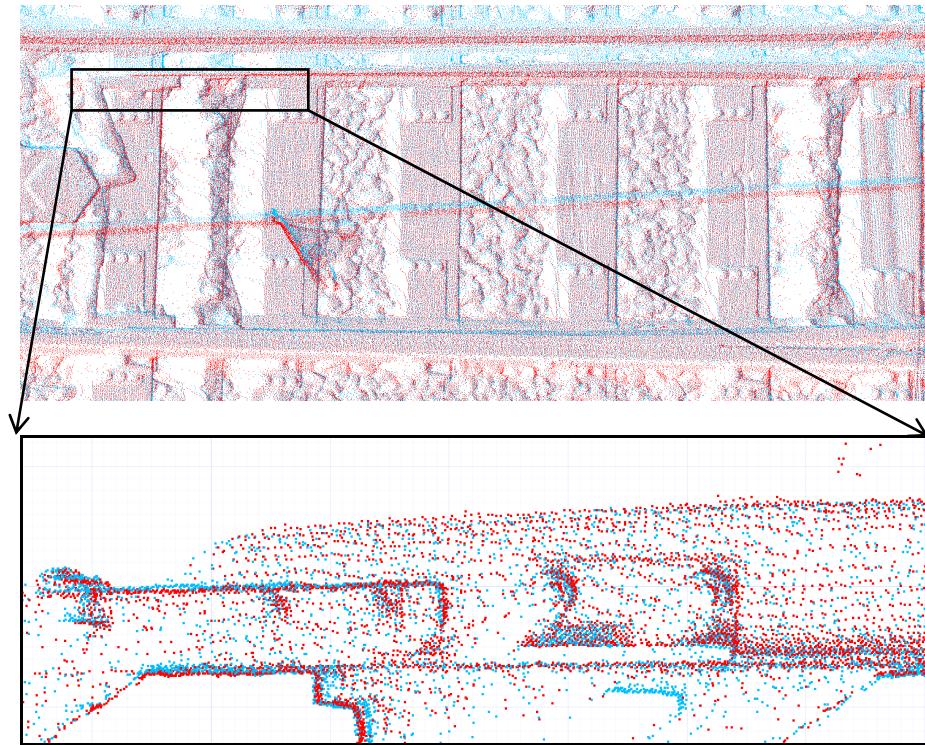


図- 5.10 RP パターンでの 2 台のレール直上レーザスキャナによる
分岐器トングレール先端の点群データ (正射投影 : 上段, 縦断表示 : 下段)

5.3.3 トングレールの高さの比較

分岐器トングレールの変状を把握することを目的として, TLS と 2 台の直上レーザスキャナの FR, RP のパターンで取得したレーザ点群を用いて, トングレールの高さを計測し比較した. 先端から 0.1m 間隔で 0.6m までの高さを 3 次元ビューワソフトで計測をした. 図- 5.11, 図- 5.12 図 - 1.3 に結果を示す. 高さは, 基準となる連結板の上端の 1 点の Z 座標からの差分とした. 分岐器の通過パターン, すなわち背向, 対向について比較をした.

連結板からの高さを比較した結果, FR, RP の計測パターン, 背向および対向の分岐器通過のパターンのいずれにおいても, 先端から 0.4m の位置から差異が広がっていた. しかし, 表- 5.1 に示すように TLS と各パターンについての高さの差分の標準偏差と平均値を見ると, すべて 0.003m 以内である. 従って, 2 台のレール直上レーザスキャナによる計測は, 高さデータにおいては TLS 計測と同等の成果をえることができるといえる.

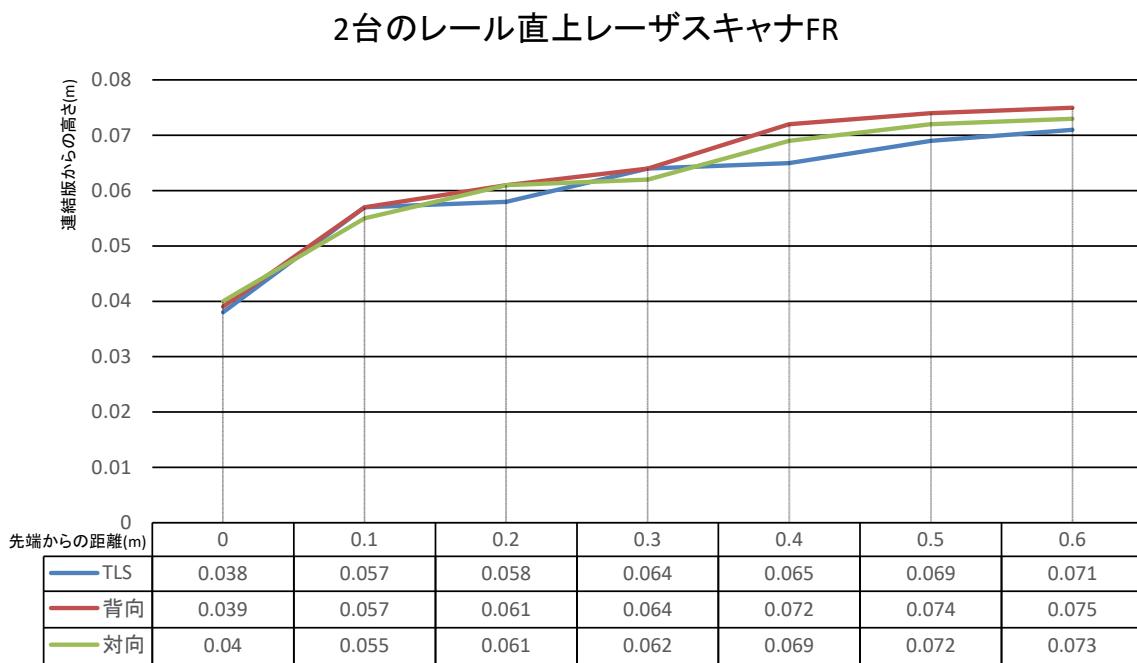


図- 5.11 TLS と 2 台のレール直上レーザスキャナ (FR) の点群データの高さの比較

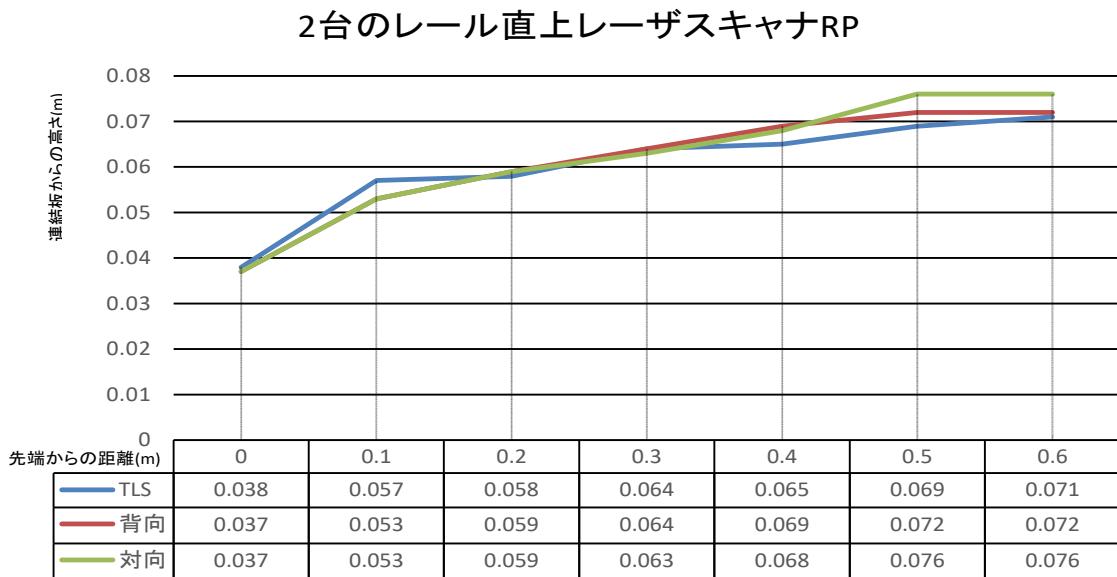


図- 5.12 TLS と 2 台のレール直上レーザスキャナ (RP) の点群データの高さの比較

5.3.4 基本レールからトングレールへの比高の比較

トングレールに関する現実的な変状のモニタリングの方法を想定し、3次元復元されたトングレールと基本レールとの比高の比較を行った。図- 5.13に結果を示す。先端から0.1m間隔で1.1mでの高さを3次元ビューワソフトで計測した。高さは、断面頭上で直近のカントの位置の点群データからZ座標を取得し、トングレールのZ座標からの差分とした。分岐器の通過パターンに

について背向、対向について比較した。

トングレールの先端部 0m の位置では、カントと比高が -0.025m から -0.045m となった。これは、レーザの入射角が広がり、実際とは違う位置に点群データが存在するためである。一方、0.1m から 1.1m の残りのすべての位置において、カントとの比高差はすべて 5mm 以内となっている。これは、レーザスキャナの基本性能を十分に満たしているといえる。

特に、0.6m から 1.0m の位置は車輪のフランジから、長手方向に鉛直な方向に圧力（横圧）を受けやすい場所で変状が起こりやすい位置であるが、その範囲の標準偏差は、0.002m であった。

さらには、先端部 0mm の位置にみられるノイズ、すなわち、実際とは違う点群データは、ボルトの位置から判読が可能であるため、容易に手動で取り除くことが可能である。従って、提案手法は TLS のデータを用いた変状判読とは差がないため、基本レールとトングレールとの高さの変状は把握することが可能であるといえる。

表- 5.1 TLS と 2 台のレール直上レーザスキャナの点群データの差分

単位 (m)

		背向	対向
2台のレール直上 レーザスキャナ FR	標準偏差	0.003	0.002
	平均値	0.003	0.001
2台のレール直上 レーザスキャナ RP	標準偏差	0.003	0.004
	平均値	0.001	0.001

基本レールからトングレールまでの高さの差分

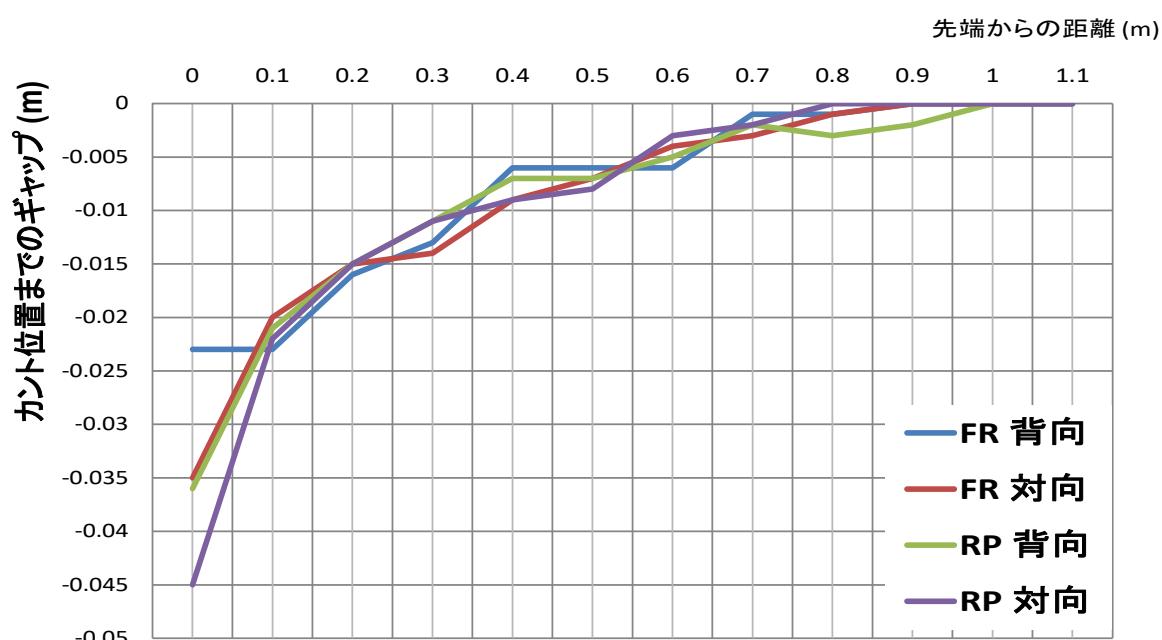


図- 5.13 基本レールとトングレールとの比高の比較

5.3.5 横圧による変状の把握

TLSによる計測は、線路の短絡防止や、三脚設置時の踏み込みがバラストなどへの影響する可能性があることを考慮すれば、線路の周囲のスペースに設置して計測することが望ましい。従つて、トングレールが基本レールに密着する側面についてレーザ点群を十分に取得することは困難となる。トングレールの先端部は、厚さが薄く、さらにフランジからの横圧を受けるため、変形を繰り返し欠損する場合もある。そのため、先端部の横方向の変状を把握することを目的として、TLSと2台の直上レーザスキャナのFR, RPのパターンで取得したレーザ点群を用いて、トングレールの厚さを計測し比較した。先端から0.2m, 0.4m, 0.6mの位置で、連結板から0.01mの高さの場所でトングレールの幅を3次元ビューワソフトで計測した。図-5.14に結果を示す。

TLSと2台のレール直上レーザスキャナで計測したレールの厚さは、標準偏差は0.005m以内で、平均は0.002mであった。この結果は、幅の数値そのもので判定するほど精密な結果とはいえない。しかしながら、基本レールとトングレールが密着する面はTLSに比べ、十分な密度で点群データが存在すると考えると、全体的な変状は確認可能と考えられる。さらに、トングレールの長手方向に連続的に点群データが取得できているため、全体的な変状を把握することが可能といえる。

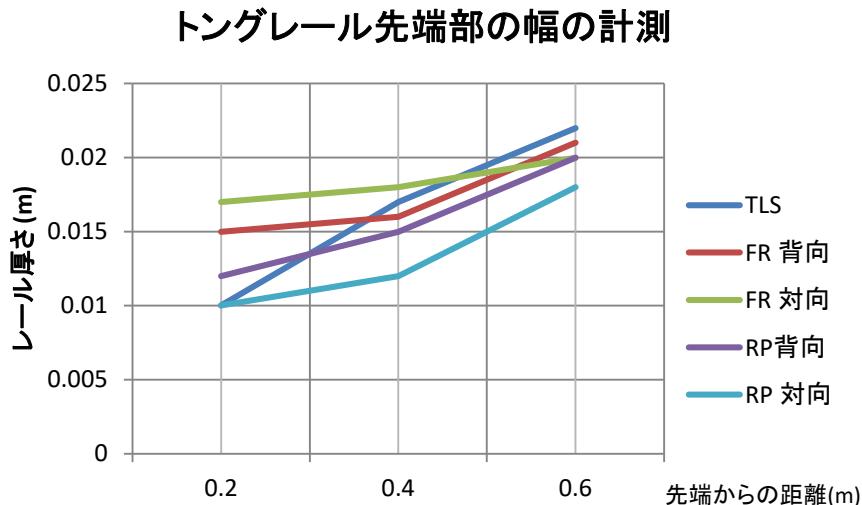


図-5.14 トングレール先端部のレール幅の比較

5.4 まとめ

本章では、2台のレール直上レーザスキャナを適用して、トングレールの変位と変形の把握を評価した。この目的のために、レールの位置の自動抽出と、軌間中心線を用いてそれぞれのレーザ点群データを整合し、トングレールの3次元復元を行った。トングレールの点群データを3次元ビューワソフトで表示し、TLSで計測された高精度な点群データと比較した。実験結果では、精度はTLSと同等であり、基本レールとの間隔が狭いトングレールの密着面を連続的に取得可能であることから計測の効率性は向上するといえる。従って、提案された方法は、トングレールの相対的な高さを用いて変状をモニタリングすることが可能である。さらに、トングレールと基本レールの接触面の状態を継続して計測することで、トングレール先端部の幅の変状を把握することが可能である。ただし、軌間中心線を用いた位置合わせの精度に関する課題が残る。加えて、トングレール先端部のノイズ除去の自動化処理等の検討も必要である。

第6章 結論

6.1 本論文のまとめ

本論文では、第3章で、2台のMMSユニットのレーザスキャナを各レールの真上に設置して取得した3次元点群データから、軌間中心位置を求める場合のレールの鏡面反射の影響を高さ方向に限定し、反射強度値を用いて重み付け平均することで、レールの高さの精度を確保する手法を提案した。この手法により、軌間中心線を求め、線路に沿った鉄道建築限界を連続的に拡大、遮減した3次元モデルを自動的な処理で生成することが可能である。モデルを支障する点群を抽出し、水平距離「離れ」と鉛直距離「高さ」を求めることができた。さらに、軌間中心線を合成して整合した2台のMMSユニットの点群データを重畳表示することで、支障物の位置を捉える確率が向上した。実験の結果、提案手法、TSおよびTLSを用いて試験線路で実験したところ、0.02m以内の精度で、支障物を抽出できることができた。

2台のレール直上レーザスキャナを用いた建築限界計測システムは、2つの課題を解決した。まず、レール直上のレーザスキャナが鏡面反射の影響を受ける方向を高さ方向に限定することで、鏡面反射による位置情報の劣化を重み付け平均で計算することで精度を向上できたことである。次に、軌間中心線という仮想的な線の位置の正確性が高いことに着目し、位置の差分を利用して、異なるMMSユニットで計測された点群データの自動的な整合手法を開発したことである。この2つの課題解決によって実現された利点はレールの種類や軌間の幅に影響されない鉄道計測手法を構築したことである。鉄道の軌間の規格は、日本国内では狭軌と標準軌が用いられることがほとんどであるが、世界的に見れば様々な軌間の幅がある。2台MMSユニットはレール直上に容易に配置が可能であることから、あらゆる軌間の線路においても鏡面反射の影響を抑えた軌間中心位置の取得が可能であり、建築限界モデルの生成が可能である。さらには、軌間を構成するレールの形状をとらえることができれば、精度の高い点群の整合が可能であるため、車両の前後に2台ずつ搭載したレール直上レーザスキャナで4台分のレーザ点群の合成が可能であるため、建築限界支障物の検出精度をさらに向上させることができる。また、近年は、レーザスキャナ装置の高性能化と低価格化が進む傾向にあり、将来は、複数台のレール直上レーザスキャナを構成することにより、レールや鉄道施設における点群データの欠落部分をさらに減少させることができた。従って、本研究の成果により、安価で、より現実に近い3次元位置情報の取得が可能となるため、建築限界支障事故の減少に貢献する技術要素を確立できたといえる。

第4章で、鉄道建築限界管理に要求される精度である0.01m以内の精度を満たし、2台のMMSのレーザ点群データの整合処理時間を短縮することを目的として、外部標定要素をキャリブレーションして求め、レーザ点群データの整合を図る手法を提案した。外部標定要素を求める計算方法には、非線形の最小二乗法のLM法を適用した。実際に試験線路を走行して計測を行い、2台のMMSのレーザ点群データ整合性を検証した結果、最大で0.005mの較差となった。キャリブレーションに要する時間は、一般的なレーザ点群処理ソフトを用い、手作業で繰り返し計算する場合は4時間から8時間かかることに対して、計測時間と計算処理時間を作らせ、2時間程度であ

った。このことにより、効率的に2台のMMSのレーザ点群を整合して、計測成果を利用するこ^ト可能となつたことを示した。

2台のレール直上レーザスキャナのキャリブレーション手法は、レーザスキャナの新しいキャリブレーション手法を確立したと言える。共面条件によるLM法による外部標定要素計算手法は、比較的に短時間に計算可能なため、第3章で提案した手法のデータ解析処理の繰り返し計算処理を省くことを可能とした。つまり、2台のレール直上スキャナで線路を長距離に計測したデータの解析処理手法が確立されたと言える。また、この方法は、モーターカーなど軌陸車を用いないレール直上レーザスキャナの計測手法にも適用することが可能である。ターゲットボードを線路に沿って様々な角度の面が取得できるように配置すれば、高精度にキャリブレーションしたレーザスキャナで点群データを取得することが可能となる。つまり軌陸車等が使用できない線路でも2台のレール直上のレーザスキャナの活用が可能となり、汎用性が高まつたと言える。

さらに、第5章で2台のレール直上レーザスキャナを適用して、トングレールの変位と変形の把握を評価した。この目的のために、レールの位置の自動抽出と、軌間中心線を用いてそれぞれのレーザ点群データを整合し、トングレールの3次元復元を行つた。トングレールの点群データを3次元ビューワソフトで表示し、TLSで主とされた高精度な点群データと比較した。実験結果では、精度はTLSと同じであり、効率性は向上する。従つて、提案された方法は、トングレールの相対的な高さを用いて変状をモニタリングすることが可能である。さらに、トングレールと基本レールの接触面の状態を計測して、トングレール先端部の変形を把握することが有効であることを示した。

2台のレール直上レーザスキャナは、通常の計測では難しい分岐器のトングレールの高さの変状をとらえていることがわかつた。このことは、分岐器の軌道も正確に把握できていることを示している。つまり、分岐器上での鉄道建築限界計測も精度よく支障判定することが可能といえる。レールのモデルを点群に適用してレール位置を解析する手法では、分岐器など複雑なレール形状の場所ではモデルの適用が困難な場合が多い。しかし、提案手法では基本レールの直上のレーザスキャナの軌間中心線に他のレーザスキャナの軌間中心線を整合させることにより、整合後の点群データの精度に問題がなかつた。MMSが、分岐器を通過する時、トングレールが基本レールに密着しないため、直下の基本レール頭部の幅は通常のレールと変わらないためである。さらに、直下では無い側方のレールにはトングレールが密着するが、軌間の端点を求める際に、レール頭部の幅を用いないため、軌間中心位置にはほとんど影響しない。そのため、高精度に点群データを整合できることから、提案手法はトングレールの変状を把握することが可能となる。従つて、2台のレール直上レーザスキャナを活用することにより、鉄道建築限界計測システムに加え、分岐器における脱線事故の防止のためのモニタリングシステムの構築が可能となつた。

6.2 今後の課題

本論文で明らかにした、2台のレール直上スキャナによる鉄道建築限界計測に関する手法は、鉄道事業における保線工事にかかる維持管理業務において省力化の促進に資する可能性を示した。保線業務における3次元空間の状況把握は労力がかかるため、自動化の必要性が強い。試験用の線路で、模擬支障物を設置し、鉄道建築限界を支障した状況を自動抽出する手法を用いても、十分な精度を示した。しかし、実際の営業線路では、曲線の曲率、カントの高さ、分岐器のレール形状の複雑さ、列車間合いの時間の短さ、安全確保のための基準の高さが異なる。そのため、実際の営業線路においての適用性についての検証が必要である。

また、2台のMMSユニットのレール直上レーザスキャナのキャリブレーション手法については、水平方向に比べ鉛直方向の精度が相対的に劣化している結果を示した。上方への平面パネルを設置したキャリブレーションがさらなる精度向上を示す可能性があると考えられる。

さらに、線路のモニタリング手法として、トングレールの変状把握への適用が可能であった。他にも分岐器クロッシングにおけるノーズレールの摩耗等、線路における事故に結びつく可能性が高いレールの変状把握も検討する必要がある。

参考文献

- 1) 総務省_e-Gov 法令検索. “鉄道に関する技術上の基準を定める省令”, Available from: <https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=413M60000800151>, [Accessed: 20-November-2019].
- 2) 石田誠. “軌道のメンテナンス”. 鉄道総合技術研究所第 20 回鉄道総研講演会, pp.37-50, 2007. 1. 9.
- 3) 須田征男, 長門彰, 徳岡研三, 三浦重. “新しい線路-軌道の構造と管理”, 日本鉄道施設協会, pp.33-34, 1997.
- 4) JR 西日本ホームページ. “岡山駅にて発生した「架線および車両故障」の原因について”, Available from: <https://www.westjr.co.jp/press/article/2016/05/page_8763.html#head-wrap> [Accessed: 4-January-2018].
- 5) 山本耕平, 西村修, 矢吹信喜. “MMS によるレール位置計測システムの研究”, 日本写真測量学会学術講演会発表論文集, pp.7-8, 2018.
- 6) 国土交通省ホームページ. “地域鉄道の現状”, Available from: <<https://www.mlit.go.jp/common/001259400.pdf>>, [Accessed: 21-Nobember-2019].
- 7) 国土交通省ホームページ. “鉄道システム維持管理の変革について（地上検査の車上化）”, Available from: <<https://www.mlit.go.jp/common/001210027.pdf>>, [Accessed: 21-Nobember-2019].
- 8) 東日本旅客鉄道株式会社. “JR 東日本グループ CSR 報告書（2015 年）”, p.11, 2015.
- 9) 田中鉄二, 樋口輝久, 馬場俊介. “規定を中心にしてみる我が国の鉄道保線の歴史”, 土木学会論文集 D2 (土木史), Vol. 67, No. 1, pp.38-48, 2011.
- 10) 和泉和弘, 堀雄一郎, 鵜飼毅彦. “分岐器の設備故障防止の取り組み”, *JR EAST Technical Review*, No.17. pp. 29-33. 2006. Available from: <<https://www.jreast.co.jp/development/tech/contents17.html>>, [Accessed: 5-January-2020].
- 11) Neubert, M., Hecht, R., Gedrange, C., Trommler, M., Herold, H., Krüger, T. and Brimmer, F. “Extraction of Railroad Objects from very high resolution Helicopter-Borne LiDAR and ortho-image data”, *Remote Sensing and Spatial Inform. Sci. XXXVIII-4/C1*, ISPRS Int. Archives Photogrammetry, pp.25-30, 2008.
- 12) Soni, A., Robson, S. and Gleeson, B. “Extracting Rail Track Geometry from Static Terrestrial Laser Scans for Monitoring Purposes”, *Remote Sensing and Spatial Inform. Sci. XL-5*, ISPRS Int. Archives Photogrammetry, pp.553-557, 2014.
- 13) Besl, P.J. and Mckay, N.D. “A Method for Registration of 3-D Shapes”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.239-256, 1992.
- 14) European Union, “Measuring and upgrading the clearance gauge of railway lines ”, Available from: <<https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2017-report-clearance-gauge-railway-lines.zip>> [Accessed: 28-August-2018].
- 15) Arastounia, M. “Automatic Classification LiDAR Point Clouds in a Railway Environment”, *MSc*

- thesis*, University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC), 2012.
 Available from: <https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2012/msc/gfm/arastounia.pdf>, [Accessed: 30-November-2019].
- 16) Benito, D. "Automatic 3D modeling of Train Rails in a LiDAR Point Cloud", *MSc thesis*, University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC), 2012. Available from: <https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2012/msc/gfm/diazbenito.pdf>, [Accessed: 30-November-2019].
 - 17) Elberink, S. O. and Khoshelham, K., "Automatic Extraction of Railroad Centerlines from Mobile Laser Scanning Data", *Remote Sens*, MDPI, pp.5565-5583, 2015.
 - 18) Arastounia, M. "Automated Recognition of Railroad Infrastructure in Rural Areas from LiDAR Data", *Remote Sens*, MDPI, pp.14916-14938, 2015.
 - 19) Arastounia, M. and Elberink, S. O., "Application of Template Matching for Improving Classification of Urban Railroad Point Clouds", *Sensors*, MDPI, pp.2112-2129, 2016.
 - 20) Pastucha, E., "Point Cloud Classification and Track Centre Determination in Point Cloud collected by MMS on Rail", INGEO 2017 – 7th International Conference on Engineering Surveying, 2017.
 - 21) Mikrut, S., Kohut, P., Pyka, K., Tokarczyk, R., Barszcz, T. and Uhi, T. "Mobile Laser Scanning Systems for Measuring the Clearance Gauge of Railways: State of Play, Testing and Outlook", *Sensors*, MDPI, pp.683-702, 2016.
 - 22) Stein, D. "Mobile Laser Scanning based Determination of Railway Network Topology and Branching Direction on Turnouts", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 16, Iss. 2, 2015.
 - 23) Zhou Y., Wang S., Mei X., Yin W., Lin C., Hu Q and Mao Q. "Railway Tunnel Clearance Inspection Method Based on 3D Point Cloud from Mobile Laser Scanning", *Sensors* , Vol. 17, No.9, MDPI, No. 2055, 2017.
 - 24) 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.55, No.2, 日本写真測量学会, pp.95-99, 2016.
 - 25) Niina, Y. Honma, R. Honma, Y. Kondo, K. Tsuji, K. Hiramatsu, T. and Oketani, E. "Automatic Rail Extraction And Clearance Check With A Point Cloud Captured By MLS In A Railway", *Remote Sensing and Spatial Information Sciences Volume XLII-2*, The International Archives of the Photogrammetry, pp.767-771, 2018.
 - 26) 遠藤健, 池田直広, 田野井淳一. "三次元形状計測機を用いた鉄道建築限界管理技術の研究開発—鉄道建築限界測定の自動化による維持管理業務の効率化と品質向上—", 東急建設技術研究所報 No. 44, No.22, 東急建設技術研究所, 2018. Available from: <<https://www.tokyucnst.co.jp/technology/pdf/shoho/no44-No44-22.pdf>>, [Accessed: 2-January-2020].
 - 27) 小林昭三, 堀井裕信. "総合鉄道線形計画支援システムの開発", 土木学会論文集F3 (土木情報学) Vol.55, No.2, 土木学会, pp.I_1-I_7, 2011.
 - 28) Terrasolid Oy Home page. "TerraMatch USER GUIDE 64-bit version", Available from:

- <<http://www.terrasolid.com/guides/tmatch.pdf>>, [Accessed: 21-November-2019].
- 29) Rieger, P., Studnicka, N., Pfennigbauer, M. and Zach, G. “Boresight alignment method for mobile laser scanning systems”, *Journal of Applied Geodesy*, 4(1), pp.13-21, 2010.
 - 30) Hong, S., Park, I., Lee, J., Lim, K., Choi, Y. and Sohn, H. “Utilization of a Terrestrial Laser Scanner for the Calibration of Mobile Mapping Systems”, *Sensors*, MDPI, pp.474-497, 2017.
 - 31) 日本写真測量学会. “解析写真測量（改訂版）”, 日本写真測量学会, pp.57-74, 1977.
 - 32) 織田和夫. “初期値推定付非線形最小二乗法による 5 点法の解法”, *写真測量とリモートセンシング*, Vol.53, 日本写真測量学会, pp.250-256, 2014.
 - 33) 織田和夫. “講座：バンドル法 第八回 コンピュータビジョンとバンドル法”, *写真測量とリモートセンシング Vol.52*, 日本写真測量学会, pp.75-83, 2013.
 - 34) Zhang, Q. and Pless, R. “A Extrinsic Calibration of Camera and Laser Range Finder (improves camera Calibration)”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2004.
 - 35) Asscheman, M. J. “Automatic object segmentation and reconstruction in LIDAR Point Clouds of railway environments”, *MSc thesis*, Utrecht University Virtual worlds Computer Science, 2017.
Available from:
<<https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/351885/thesis-asscheman-v1.5-optimized.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>, [Accessed: 30-November-2019].
 - 36) Yang, B. and Fang, L. “Automated Extraction of 3-D Railway Tracks from Mobile Laser Scanning Point Clouds”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 7, pp. 4750–4761, 2014.
 - 37) Hackel, T., Stein, D., Maindorferz, I., Lauery, M. and Reiterer, A. “Track detection in 3D laser scanning data of railway infrastructure”, In: *Proc. IEEE Int. Instrum. and Meas. Technol. Conf.* pp. 693–698. 2015.
 - 38) B. E. Boser, I. M. Guyon, and V. N. Vapnik, “A training algorithm for optimal margin classifiers,” in *Proc. Ann. Workshop on Comput. Learning Theory*, pp.144–152, 1992.
 - 39) Xiong, Z., Li, Q., Mao, Q. and Zou, Q. “A 3D Laser Profiling System for Rail Surface Defect Detection”, *Sensors*, Vol. 17, 1791, MDPI, pp.1-19, 2017.
 - 40) Pavemetrics. “Laser Rail Inspection System (LRail)”, Available from:
<http://www.pavemetrics.com/wp-content/uploads/2016/03/LRAIL_Flyer2.pdf> [Accessed: 26-June-2017].
 - 41) Gabara, G. and Sawicki, P. “A New Approach for Inspection of Selected Geometric Parameters of a Railway Track Using Image-Based Point Clouds”, *Sensors*, Vol. 18, No. 791, MDPI, pp.1-16, 2018.
 - 42) 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) 74(2), I_70-I_81, 2018.
 - 43) 山本耕平, 陳天恩, 矢吹信喜, “2 台の MMS ユニットを用いた鉄道 3 次元計測のためのキャリブレーション手法に関する検討”, 応用測量論文集 30, 日本測量協会, pp. 51-62, 2019.
 - 44) Yamamoto, K. and Yabuki, N., “Measuring Railroad Switch by Using Two Mobile Laser Scanners Directly Above the Rails”, in *Proceedings i3CDE 2019*, pp.350-358, 2019.

- 45) Yamamoto, K. and Yabuki, N., "Measuring Railway Facilities by Using Two Mobile Laser Scanners Directly Above The Rails", in *Proceedings ICCBEI 2019*, pp.392-397, 2019.
- 46) 矢吹信喜, 蒔苗耕司, 三浦憲二郎. “工業情報学の基礎”, 理工図書, 2011.
- 47) 榎本昌一, 増田 宏, 田中一郎. “位相差方式レーザスキャナの計測誤差の評価と推定”, 精密工学会学術講演会論文集, 2012A (0) , 精密工学会, pp. 293-294, 2012.
- 48) 長島忍. “球面投影による多面体の内外判定方法”, 情報処理学会論文誌, 情報処理学会, Vol.27, No.7, pp.744-746, 1986.7.
- 49) 国土交通省国土地理院ホームページ. “日本の測地系”, Available from: <<https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/datum-main.html#p7>>, [Accessed: 23-November-2019].
- 50) 国土交通省国土地理院ホームページ, “GNSS を使用した測量のいろいろ”, Available from: <https://terras.gsi.go.jp/geo_info/GNSS_iroiro.html>, [Accessed: 30-November-2019].

謝辞

本論文をまとめるにあたり、直接の御指導、御鞭撻を頂き、お世話になりました主査の大坂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に謹んで感謝の意を表します。また、副査の澤木昌典教授、福田知弘准教授に深く感謝いたしております。

研究を支えて頂きました同研究室の博士後期卒業生である藤澤泰雄様、有賀貴志様、羽鳥文雄様、田原孝様、日高菜緒様、四月朔日勉様、Worawan Natephra 様、影山輝彰様ならびに、博士課程の八巻悟氏、福士直子氏、Yaser Alipour 氏、池田雄一氏、Chavanont Khosakitchalert 氏、Natthapol Saovana 様、朱閑晗様と屋代裕一様、全ての方にここに感謝申し上げます。

また、本研究の遂行に際し、多大な御協力と有益な御意見および御討論を頂いた、(株)パスコ島村秀樹氏、橘菊生氏、望月貫一郎氏、佐藤俊明氏、陳天恩氏、坂元光輝氏、間野耕司氏、本間昭信氏、前田近邦氏の各位には、深甚なる謝意を表します。実験計測にあたり、(株)レンタルのニッケン待兼二郎様、(株)パスコ関西事業部技術センター国土情報部片桐久典氏、友成章人氏、(株)パスコ環境文化コンサルタント事業部技術センター文化財技術部林大貴氏、福井拓馬氏、吉原万智氏、(株)パスコ事業統括本部新空間情報部黒須秀明氏、安井嘉文氏、松田慎也氏、其阿彌大祐氏、金森紘代氏、稻見麻央氏、(株)エリジョン吉富望様、(株)ソフトウェアコントロールの各位の御協力に深く感謝いたします。

研究生活にわたって、研究の面に、多くの支援および激励を頂いた(株)パスコ伊東秀夫氏、川久保雄介氏、平尾公孝氏、岡本芳樹氏、五十嵐善一氏、西村修氏、矢尾板啓氏に心よりお礼申しあげます。また、精神面で応援くださった母昌子、妻浩美、長男修平、二男竜也に感謝致します。

本研究は、以上の方々を始め、多数の方々の御指導、御協力のもとに達成できたものであり、ここで関係各位の皆様に感謝致します。