

(10) モービルマッピングシステムによる 鉄道建築限界可視化システムの検討

山本 耕平¹・矢吹 信喜²

¹正会員 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 博士後期課程
E-mail : u647580h@ecs.osaka-u.ac.jp

²フェロー会員 大阪大学教授 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
E-mail : yabuki@see.eng.osaka-u.ac.jp

移動計測車両(Mobile Mapping System: MMS)を用いて、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、建築限界断面の中心位置抽出のための計測手法および建築限界の可視化システムを検討した。建築限界断面の中心は、2本のレールの軌間の中心をレールの高さに合わせて位置であるため、MMSによるレーザ計測の走査線を用いてレール頭部の点群位置から算出し評価した。また、連続した軌間中心位置に建築限界断面モデルを出力し、3次元で可視化するプログラムを試作した。その結果、曲線区間で拡大した建築限界を用いて、支障物を0.02m以下の精度で把握できることが確認できた。

Key Words: railway clearance gauge, mobile mapping system, 3D point clouds collision detection, monitoring, maintenance

1. はじめに

鉄道事業者は省令による技術基準を維持するため、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が、平成19年2月に施行された維持管理標準¹⁾に対応するため、すべての鉄道事業者が同じ体系でメンテナンスを行っている。

技術基準の中において、建築限界は安全性にかかわる基準であり、すべての施設の施工、工事後に点検を実施しなければならない。建築限界は、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」と定義される²⁾。

この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、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がある。図-1に曲線区間において仮設材料が建築限界を支障していたため、貨物列車と接触した事故の例を示す³⁾。線路は、直線・曲線区間において、建築限界の形状を把握することが困難である。レールは、摩耗または削正され、高さも変化する。さらに、自然災害等や地盤の変化などにより、周囲との位置

関係も変化する可能性がある。それゆえ、建築限界は定期的な点検による状況の把握だけではなく、工事作業時に把握するモニタリングシステムの構築が必要である。

近年では、固定式MMSを取り付け、車両ごと台車に乗せて計測し、レール位置や建築限界を把握する研究が盛んである⁴⁾。しかし、固定式MMSのレーザ計測は、進行方向に斜めに角度を持つ場合は、2本のレールを横断方向に同時にとらえることが難しい。

そこで本検討では、工事用軌陸運搬車両（以降、軌陸車）に着脱式MMSを搭載して線路を走行して計測した。

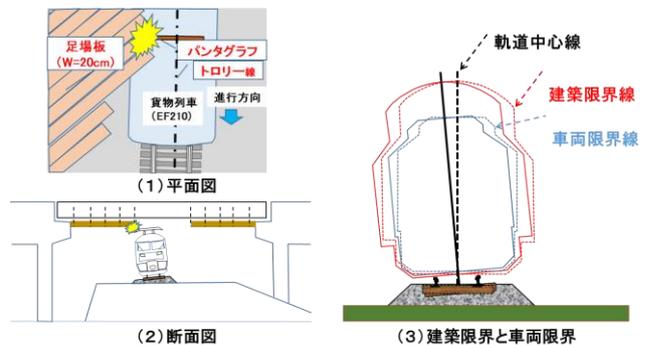


図-1 仮設された足場材が支障していた例 (2016.5)

3次元レーザ点群データから建築限界断面を算出し、可視化するシステムを試作し、実験を行った。

2. 本研究の着目点

MMS は、車両に GNSS 受信機、慣性計測装置、レーザスキャナなどの計測機器を搭載し、自己位置と姿勢を測定しながら車両周辺の3次元形状を計測できる車載レーザ計測システムである。処理後の3次元レーザ点群データは、全ての点に、GNSS の時刻情報が付与されている。よって、時刻情報を条件設定すれば、レーザ走査線ごとに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5ミリ秒単位で取得されているため、相対的な精度が保たれる。この走査線単位でレールの頭部の位置情報を用いて、軌間中心点とレールの高さを求め、建築限界断面の形状をレーザ走査線単位で生成することが可能となる。

また、建築限界断面の形状精度は、レールの高さ精度が影響するため、レーザ点群がレールの頭頂面を十分にとらえていない場合は、曲線のカント部分の高さが低くなり、建築限界の断面が傾く。

そこで、MMS のレーザユニットをレールの真上に配置して計測することにより、各レールの頭頂面をとらえることが可能となる。本検討では、2台のMMSを同時に各レールの真上で計測することにより、同じ車両の姿勢で照射されたレーザ点群を合成することにより、レール全体の3次元レーザ点群データから軌間を求める場合の精度も確認する。

3. 実験

(1) 対象の線路

実験計測は、約60mの直線区間と途中で分岐する約35mの曲線区間を対象に行った。電柱や、架空線がある線路作業用車両の試験用線路を計測した。

(2) 使用したMMSと計測諸元

本検討では2台のLeica社製Pegasus Twoを軌陸車に搭載するようにシステム構成し、線路を走行して計測する。図-2に外観を示す。このMMS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、対象物の測定用にZ+F社製のLaser Profiler 9012を搭載している。計測諸元は、走行速度14.4km/時、レーザ照射数102万発/秒、回転数200回転/秒とし、5m離れたレール位置で、線路延長方向の点間隔で0.02mを確保できる設定と

した。表-1に計測諸元をまとめる。

(3) 固定局の観測と検証点の取得

MMS で得られる3次元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点設置した。その基準点を使用して、整準台にターゲットを設置、観測し、検証点を起終点に配置した。使用した測量機器は、GNSS 受信機：Nikon-Trimble 社製 NetR9、トータルステーション（以降TS）：S65+である。

(4) MMS計測

MMS 実験計測は、軌陸車の後部に並べて、各レールの真上に配置して計測した。また、距離計情報を用いる自己位置解析に必要なため、各MMSとレール面との比高をTSで計測した。表-2示すようにTSの検証点とMMS点群の座標を比較し位置情報の品質を確認した。



図-2 使用したMMS機材

表-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2.2(m)
	照射数	102万発/秒
	回転数	200回転/秒
	計測精度	±0.005m
MMS点群 の点間隔	進行方向	0.02m
	横断方向	0.005m (5m先)

表-2 各MMSとTS検証点との比較

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

(5) 比較する基準となる計測

レールの軌間の精度を比較するためのレール形状計測と、建築限界支障物の精度を比較する3次元点群データの取得を実施した。

レール形状計測は、線路の軌間を Leica 製 TS : TCRP 1201+で行った。すべての計測点は、TS から 10m 以内の距離に収め、プリズム付ピンポールを使用して計測した。横断面上のレールを、頭部、底部について計 20 点で計測し、断面は曲線、直線を 6 断面ずつ 1m 間隔で計測した。

また、3次元点群データの取得は地上型レーザスキャナ : Leica 製 P40 により計測を実施した。計測位置を線路の両側に挟み込むように計画し、10m 以内の間隔となるように設置した。合成処理は後処理ソフトで、計測間の較差を 3mm 以内となるように設定した。

4. MMS データを使用した建築限界算出の検討

(1) 軌間中心

MMS 計測データから抽出した走査線単位のデータを用いて、それぞれのレールの頭部の中心位置と、水準位置の代表点を通る直線を生成して軌間線とし、その中点を軌間中心として求めた。図-3 に走査線と軌間中心の抽出概要を示す。

真上に MMS を配置したレールの形状は、レールの頭頂面と底部をとらえているが、頭部の側面にかけて丸みを帯びる部分はレーザ点群が実際とは違う位置にノイズとして現れる。そこで、頭頂面の位置に並ぶ点群を抽出する。まず、MMS とレール面の距離はほぼ一定であることを条件に点群を抽出して異常値を除く。抽出した点群の中で、反射強度値が標準偏差以内の座標値から、水平方向の mean 値を取り、標高は最大値を与えて仮中心の座標とする。

一方、横方向に照射された、対になるレールの形状をとらえた点群は、曲線区間などにおいて頭頂面付近で入射角が浅くなり、全体をとらえられない可能性がある。そのため、頭頂部付近の点群の高さ情報を用いることとし、反射強度の値が標準偏差内の点群について、標高値が最大となる点を用いて水準位置の代表点とした。

点を結線し、軌間線を作成した後、それぞれに求めた点から、軌間中心位置を求める。軌間線上を仮の中心位置からオフセットした位置を線分の始点とする。日本で一般的な規格である 50N および 60N レールの頭部の寸法を条件として算出し、オフセット量を 32mm とした。

また、横方向のレールでは水準位置の代表点からの標高差が 14mm 以内の最も近い点を探索し、その点から軌

間線分に垂線を下した交点を軌間線分の終点とした。

線分の始点と終点の座標から、中点の位置座標を算出し軌間中心点とした。

(2) 建築限界断面の生成

建築限界形状は、連続する軌間線に鉛直な平面上に表すことができる。本検討では、MMS が移動した軌跡のベクトルと直交する断面に描画するものとした。建築限界は、軌間中心点を中心、その断面に建築限界図形を配置した。

本検討では、軌間中心点を、全ての走査線上で求めることができるため、MMS の進行方向の点間隔単位で建築限界断面を配置することが可能である。

5. 建築限界模擬支障物の実験

検討した建築限界の可視化手法を用いて、線路内の支障物への適用性を確認するために、曲線区間に模擬的な支障物を設置し、TS、地上型レーザスキャナ、MMS で計測を実施した。図-4 に支障物の設置状況図を示す。

建築限界管理では、支障物を軌間中心からの水平距離を“離れ”，レールの高さまでの標高差を“高さ”として数値管理している。模擬支障物は、離れを約 1m、高さを 5m から 5.5m に No.1~3 を設置し No.3 と同じ高さで、線路方向に 0.75m 離れた位置に No.4 を設置した。

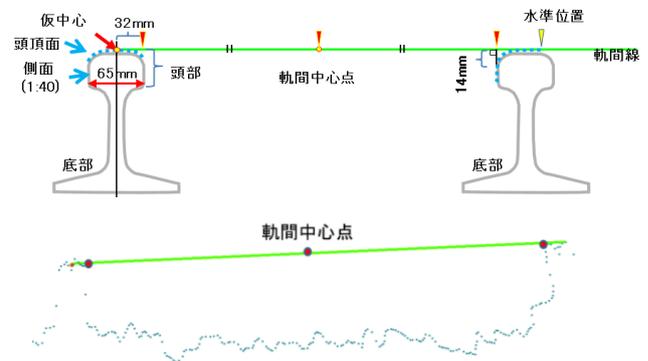


図-3 走査線と軌間中心の抽出概要

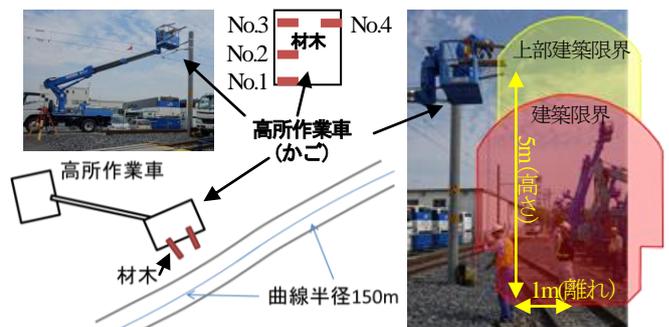


図-4 支障物の設置状況

表-3 MMS と軌間の長さの相対精度

支障物	No. 1		No. 2		No. 3		No. 4	
	離れ(m)	高さ(m)	離れ(m)	高さ(m)	離れ(m)	高さ(m)	離れ(m)	高さ(m)
地上型レーザスキャナ	1.189	4.943	1.171	5.222	1.150	5.497	1.081	5.513
左MMS	1.188	4.942	1.162	5.230	1.140	5.507	1.170	5.520
右MMS	1.192	4.937	1.157	5.242	1.157	5.491	1.057	5.533

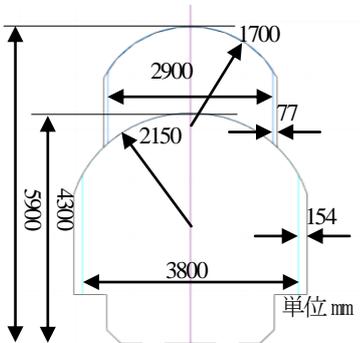


図-5 建築限界と拡大建築限界

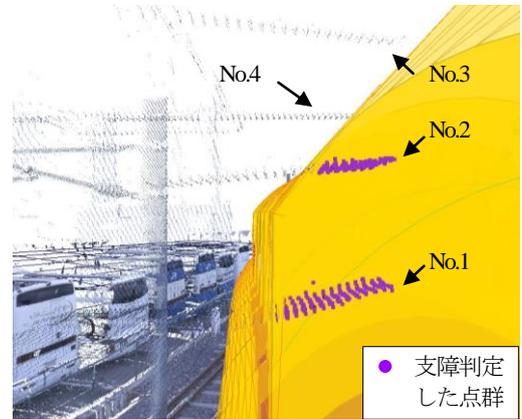
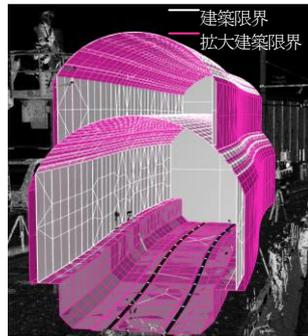


図-6 模擬支障物の判定結果

実験線路は、曲線であるため、建築限界は直線よりも拡大される。それは、営業線路の曲線区間では、車両を支える2台の台車が曲線をまたぐ時、建築限界は前後の端、車両中間がそれぞれ外側、内側に膨らむためである。これを車両の偏倚という。曲線半径 R における偏倚の拡大量 W は、式(1)のようになる。

$$W = 23100/R \quad (1)$$

線路の曲線区間の半径は 150m であり、拡大量は、上部建築限界で 154mm、電化区間の追加箇所では 77mm となった。この線路について一般在来線交流電化区間の建築限界と拡大建築限界を図-5 に示す。

3次元ビューワで作成した拡大建築限界を用い、支障物を抽出した結果を図-6 に示す。上部建築限界において、No.1, 2 は建築限界を支障しており、No.3, 4 は近接している状況が確認できた。地上型レーザスキャナと MMS を比較した結果を表-3 に示す。離れ、高さは、概ね 10mm 以内の差となった。例外的に2台の MMS の間で 20mm 以上の差となることがあった。これは、高さ 5m 付近の材木に、走査線が横断方向に 20mm 前後の間隔となり、横断方向に差異を生じるためと考えられる。

6. 結論

鉄道建築限界の断面を MMS のレーザスキャナの走査

線単位で作成し、3次元で可視化する手法を検討し、曲線レールにおける拡大建築限界での支障物抽出の適用性を確認した。他の計測手法と比較し、10 mm 以内の誤差で支障物を抽出可能であり、有効な建築限界管理の数値を自動的に算出可能である。本検討手法の実用化により、工事作業時に建築限界をモニタリングすることが可能となった。

今後の課題として、実際の営業線路での適用がある。また、ソフトウェアへの実装を行い実用化を目指す。

謝辞：本研究の遂行においては、(株)レンタルのニックンに協力していただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：http://elaws.e-gov.go.jp/search/elaws/Search/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=413M60000800151 (入手 2018.1.4)
- 2) 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-, pp.33-34, 日本鉄道施設協会, 1997.
- 3) JR 西日本：https://www.westjr.co.jp/press/article/2016/05/page_8763.html#head-wrap (入手 2018.1.4)
- 4) 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, pp.95-99, Vol.55, No.2, 2016.