

# 携帯情報端末で取得した列車前方動画による 線路周辺空間の復元

梶原 和博\* 田中 博文\*

## 3D Reconstruction of Railway Track-side Environments Using Forward-Facing Smartphone Videos Captured on a Train

Kazuhiro KAJIHARA Hirofumi TANAKA

To address labor shortages and an aging workforce, this study investigates the use of train forward-facing videos captured by smartphones for efficient railway track maintenance. For this purpose, 3D spatial models of tracks and surrounding infrastructure were reconstructed using SfM-MVS techniques. The results suggest that these models have the potential to serve as low-cost, alternative or complementary tools for labor-intensive tasks, such as track alignment maintenance and construction surveying of railway facilities.

キーワード：列車巡視，スマートフォン，列車前方動画，SfM-MVS，3次元空間モデル

## 1. はじめに

生産年齢人口の減少や就業者の高齢化が進行する社会情勢において、老朽化する鉄道施設を適切に維持管理していくために、鉄道施設の検査・維持管理業務の省人化が喫緊の課題となっている。特に地域鉄道事業者は、予算、人員状況、人材育成、技術開発などの面で特に厳しい環境にあり、鉄道輸送の安全を確保していくための保守体制の継続が容易でない状況にあることが報告されている<sup>1)</sup>。このような背景から、近年ではスマートフォン等の携帯情報端末（以下、携帯情報端末）を活用し、目視や体感に依存した列車巡視業務を低コストに省力化・高度化する手法が提案されている<sup>2) 3)</sup>。また、携帯情報端末で測定した鉄道車両の振動を列車動揺管理に適用し、動的な軌道状態を高頻度に把握する検討も行われている<sup>4) 5)</sup>。これらの事例では、加速度と同時に列車前方動画も取得可能な場合が多いが、列車前方動画は軌道状態や沿線環境の概況を目視で把握する際の補助手段としての活用に留まっている<sup>2) 3) 4)</sup>。

一方、近年は列車の運転室内に仮設したビデオカメラまたは固定したステレオカメラを用いて、線路周辺の3次元空間情報を取得し、設備点検や列車巡視業務を効率化する手法が検討されている<sup>6) 7)</sup>。ここで、列車前方動画の撮影に携帯情報端末を適用することができれば、比較的 low cost に導入できることに加え、1台の端末で加速度や位置情報等の多様なデータを同時に取得できるため、鉄道事業者の規模を問わず様々な検査・点検業務への活用が期待できる。一方、携帯情報端末は計測に特化した機器でないため、一般に列車前方動画の撮影に用いられる機器と比較してデータの保存容量に限りがある。そのため、列車前方動画の用途に応じて、適切な画質、フレームレート、画角等を検討する必要がある。

そこで、本研究では、携帯情報端末で取得した列車前方動画の活用に向けた基礎検討として、多視点の画像から対象物の3次元形状を推定する SfM-MVS 技術<sup>8) 9)</sup> を携帯情報端末で取得した列車前方動画に適用し、軌道および線路周辺の3次元空間モデルを作成した。そして、動画のデータ容量、SfMの解析時間、3次元空間モデルの作成効率等の観点から撮影方法を比較検証するとともに、得られた3次元空間モデルの精度検証や活用法の検討を行った。

\* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

## 2. 携帯情報端末で取得した列車前方動画を用いた3次元空間モデルの作成手法

### 2.1 SfM多視点ステレオ写真測量(SfM-MVS)の概要

SfM-MVS (Structure from Motion - Multi-View Stereo Photogrammetry) は、対象物を撮影した複数の画像から3次元空間モデルを作成する手法であり、SfMとMVSの2つの工程で構成される。SfMでは、対象物を撮影した複数枚の画像から共通する特徴点を抽出し、特徴点で構成される低密度の点群(以下、低密度点群)を生成するとともに、特徴点の位置関係を基にカメラの位置・姿勢やレンズの歪みなどの内部標定要素を推定する<sup>8)</sup>。MVSでは、SfMで推定した情報をもとに3枚以上の画像を同時に利用して多視点ステレオ計測を行い、対象物の高密度な点群やメッシュモデルを作成する<sup>9)</sup>。本研究では汎用のソフトウェアである3D Flow社製の3DF ZEPHYR<sup>10)</sup>(以下、SfM解析ソフト)を用いて、列車前方動画から画像フレームの抽出および抽出した画像フレームに対するSfM-MVS解析を行った。なお、解析に用いたPCは、CPUとしてIntel Corei9-9900K(3.60GHz, 8コア, 16スレッド)、GPUとしてNVIDIA GeForce RTX 2080 Tiを搭載しており、SfM解析ソフトはWindows11 Pro上で実行した。

### 2.2 列車巡視支援アプリの概要

携帯情報端末を用いた列車前方動画の取得にあたり、列車巡視支援アプリケーション「Train Patroller」<sup>2)</sup>(以下、既開発APP)を使用した。図1に既開発APPの動作イメージを示す。既開発APPは、Apple社製のiOSを搭載した携帯情報端末で動作するアプリケーションであり、携帯情報端末に内蔵された各種センサを用いて、表1に示す計測項目を取得することができる。各計測項目はサンプリングレートが異なるが、同時に記録されるため、適切なサンプリング処理によって同期させることが可能である<sup>2)</sup>。また、動画の撮影条件として、フレームレートは10, 20, 30, 60fps、画質はVGA, HD, Full HD, 4Kを選択可能である。このうち、VGA画質の動画は、列車前方動画の活用に対して解像度が不十分と考えられたため、本研究ではHD画質以上の列車前方動画を検討対象とした。



図1 既開発APPの動作状況のイメージ

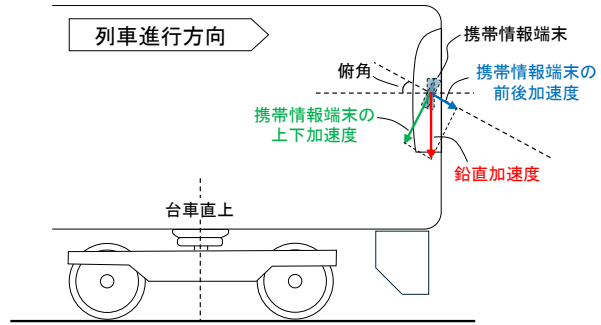
表1 既開発APPの主な計測項目

センサ	計測項目	計測モード			サンプリングレート (ファイル形式)
		振動	振動&動画	動画	
GPS レーザー	列車速度	○	○	○	1Hz (txt形式)
	緯度・経度	○	○	○	
モーションセンサ	加速度(3軸)	○	○	—	100Hz (txt形式)
	角速度(3軸)	○	○	—	
カメラ(背面)	動画	—	○	○	10/20/30/60fps (mp4形式)
マイクロフォン	音声	○	○	○	44.1kHz (m4a形式)

図2に、携帯情報端末を鉄道車両へ設置する方法の例を示す。同図(a)に示すように、携帯情報端末を鉄道車両の前頭のフロントガラス面に吸盤式の治具を用いて固定することで、任意の画角で列車前方動画を撮影することができる。一方、この設置方法で加速度を同時に計測する場合、鉛直方向の加速度は、鉄道車両のピッチングの影響等により、列車動揺の測定位置として推奨<sup>11)</sup>される台車直上での計測値と比較して、5~15%程度大きくなることが知られている<sup>4)</sup>。また、携帯情報端末を水平面に対して傾斜角(以下、俯角)を付けて設置した場合、携帯情報端末の上下方向の加速度は、同図(b)に示すように鉛直方向の加速度と一致しないため、携帯情報端末の上下・前後方向の加速度のベクトル合成により補正することが望ましい<sup>2)</sup>。



(a) 鉄道車両の前頭への設置方法の例



(b) 俯角と加速度の関係

図2 携帯情報端末の鉄道車両への設置方法の例



(a) 俯角 9°



(b) 俯角 27°

図3 列車前方動画から抽出した画像フレームの例

### 2.3 撮影試験の概要

本研究では、鉄道総合技術研究所内の試験線において、既開発 APP をインストールした携帯情報端末（Apple 社製、iPhone15 Pro）を、車両の運転台中央のフロントガラスに吸盤治具を用いて固定し、列車前方動画を撮影した。撮影区間は、直線と曲線（最小曲線半径は  $R=160\text{m}$ ）で構成され、延長は約 700m である。また、撮影時の車両の速度は  $40\text{km/h}$  程度以下であり、各撮影で車両の運転曲線（ランカーブ）は概ね同一である。

撮影試験では、既開発 APP の計測モードを「振動&動画」とし、表 1 に示した項目を収録した。撮影時は既開発 APP で動画のフレームレートを 60fps に固定し、画質（HD, Full HD, 4K）と携帯情報端末の俯角（ $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $30^\circ$  を目標に設定）を都度変更しながら、列車前方動画を複数回撮影した。なお、携帯情報端末の俯角は図 2(a)に示した吸盤治具で調整するが、実際の俯角を上述した設定目標値と厳密に一致させることが困難なため、以降の検討では既開発 APP の水準器機能で確認した実際の俯角を示す。

図 3 に列車前方動画から抽出した画像フレームの例を示す。俯角  $3^\circ$ （設定目標値  $0^\circ$ ）および図 3(a)に示す俯角  $9^\circ$ （設定目標値  $10^\circ$ ）は軌道周辺および沿線環境、図 3(b)に示す俯角  $27^\circ$ （設定目標値  $30^\circ$ ）は主に軌道部材状態の確認へ活用することを想定して、本検討で設定した撮影方法である。

## 3. SfM-MVS における各種撮影条件の影響

### 3.1 動画のデータ容量

既開発 APP で取得したデータは携帯情報端末の内部ストレージに保存されるため、撮影した動画のデー

タ容量は必要最小限であることが望ましい。図4に撮影試験において既開発APPで取得した動画のデータ容量の一例を示す。iPhone15 Proで動画を撮影した場合、動画のデータ容量を決めるビットレートは撮影時の外部環境や携帯情報端末の内部処理等に依存する。撮影試験で取得した動画(60fps)のビットレートは、4K画質で54~93Mbps、Full HD画質で15~26Mbps、HD画質で9~12Mbpsの範囲でばらついた。そこで、同図に用いたビットレートは、4K画質(60fps)で70Mbps、Full HD画質(60fps)で20Mbps、HD画質(60fps)で10Mbpsとし、60fps以外の動画のビットレートは、画質ごとに上述したビットレートにフレームレートの比率を乗じた値を示している。この場合、4K画質で撮影した動画のビットレートはFull HD画質の3.5倍、撮影時間60分あたりのデータ容量は4K画質(60fps)で約31GB、Full HD画質(60fps)で約9GBとなる。この結果から、4K画質の動画の利用は、携帯情報端末の内部ストレージ容量やデータ伝送負荷の観点で制約を伴うことが想定される。

### 3.2 SfMに要する解析時間

SfM-MVSによる一連の解析には数時間を要する必要があるため、解析時間を考慮して列車前方動画の撮影条件を検討することが望ましい。そこで、撮影試験で取得した列車前方動画を用いて、列車前方動画の画質が低密度点群の作成に要する時間(以下、SfM解析時間)に与える影響を検証した。

図5に、SfM解析時間と画像フレーム数の関係を示す。同図の横軸は、SfM解析ソフトを用いて列車前方動画(俯角3°)から所定のフレームレート(10, 20, 30, 60fps)で抽出した画像フレーム数である。ここで、同一画質では同じ列車前方動画をSfMに用いているため、画像フレーム数の増加はフレームレートの増加に対応する。同図の近似曲線(指数関数)に示すように、SfMに用いる画像フレーム数が多いほどSfM解析時間は指数関数的に増加した。また、画像フレーム数が同等の場合、解析時間はHD画質が最も少なく、4K画質はHD画質と比べて大幅に増加するものの、Full HD画質との差は限定的であった。

なお、図5に示すデータプロットは、画質ごとに列車前方動画の撮影時期が異なるため、SfM解析時間の傾向は動画撮影時の日照条件等の環境要因の影響を含む可能性が考えられる。この点については、リサイズ処理によって画質を変換した同一動画を用いた検証を別途実施しており、今回の試験条件においては、列車前方動画の撮影環境の違いがSfM解析時間に与える影響が小さいことを確認している<sup>12)</sup>。

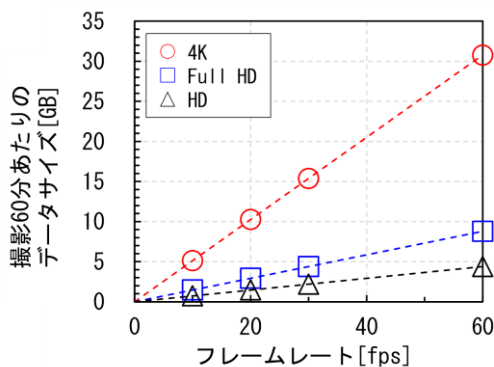


図4 動画データ容量の例

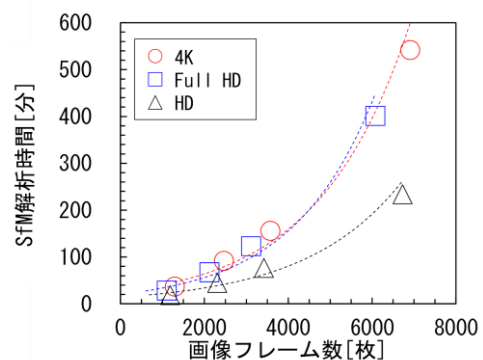


図5 SfM解析時間と画像フレーム数の関係 (俯角3°)

### 3.3 低密度点群の点群数

一般にSfM-MVSで対象物の形状を復元する場合、特徴点が多いほど対象物の形状を詳細に再現できる。そこで、撮影試験で取得した列車前方動画を用いて、列車前方動画の画質が低密度点群の点群数(以下、低

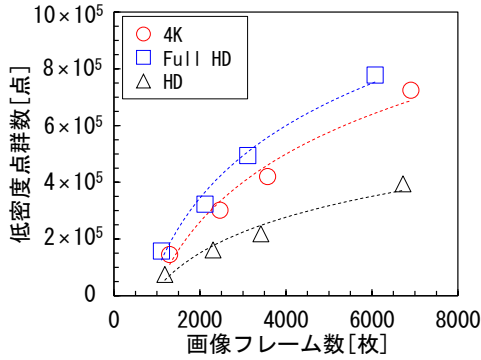


図6 低密度点群数と画像フレーム数の関係 (俯角 3°)

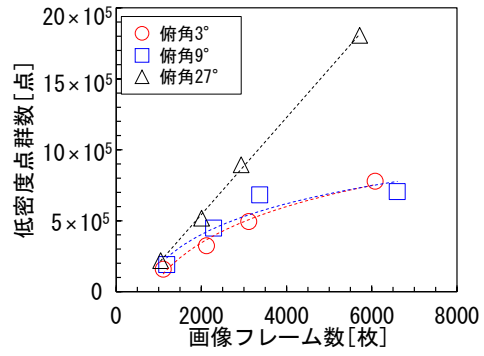


図7 低密度点群数に対する俯角の影響 (Full HD 画質)

密度点群数) に与える影響を検証した。

図6に、低密度点群数と画像フレーム数の関係を示す。同図のデータセットの構成および SfM に用いた列車前方動画は、図5と同様である。図6では近似曲線(対数関数)も示しており、SfM に用いる画像フレーム数が増加するにつれて低密度点群数の増加が緩やかになることがわかる。この傾向は、画像フレーム数が多いほど連続する画像間の視差が小さくなり、画像フレーム間で共通する特徴点を見つけやすいという SfM の特性<sup>13)</sup>と整合する。一方、画像フレーム数が同程度の場合、低密度点群数は HD, 4K, Full HD 画質の順に増加し、有効画素数に比例しない傾向が見られた。本傾向は、使用する画像フレームの有効画素数が多いほど、画像フレーム間で特徴点を対応付ける際に有利であるという一般的な傾向<sup>8)</sup>と異なる。この要因として、今回使用した SfM 解析ソフト内部のアルゴリズムが影響している可能性も考えられるため、様々な撮影条件を考慮して本要因を詳細に検証する予定である。

なお、図6に示すデータプロットは、3.2節と同様に画質ごとに列車前方動画の撮影時期が異なるため、低密度点群数の傾向は動画撮影時の日照条件等の環境要因の影響を含む可能性がある。そこで、リサイズ処理によって画質を変換した同一動画を用いた検証を別途実施しており、今回の試験条件においては、列車前方動画の撮影環境の違いが低密度点群数に与える影響が小さいことを確認している<sup>12)</sup>。

### 3.4 携帯情報端末の俯角の影響

携帯情報端末で列車前方動画を撮影する場合、確認したい対象物に応じて携帯情報端末の俯角を設定することが考えられる。そこで、携帯情報端末の俯角が低密度点群数に与える影響を検証した。

図7に、低密度点群数と画像フレーム数の関係を携帯情報端末の俯角で整理した結果を示す。同図には、3.3節で低密度点群数が最も多かった Full HD 画質の列車前方動画に対する SfM の結果と、直線または対数関数に基づく近似線を示す。同図より、俯角 9°(設定目標値 10°)以下の場合は、SfM に用いる画像フレーム数の増加に伴って、低密度点群数が対数関数的に増加する傾向が見られた。一方、俯角 27°(設定目標値 30°)の場合は、低密度点群数は画像フレーム数の増加に伴って線形に増加する傾向にあった。この要因として、本試験の撮影条件では、俯角が大きいほど画像フレーム全体に占める軌道周辺の領域が広くなり、被写体の分解能が高くなることで特徴点を検出しやすくなった可能性が考えられる。

## 4. 3次元空間モデルの活用法の検討

列車前方動画から抽出した画像フレームに SfM-MVS を適用することで、列車前方動画の撮影経路の推

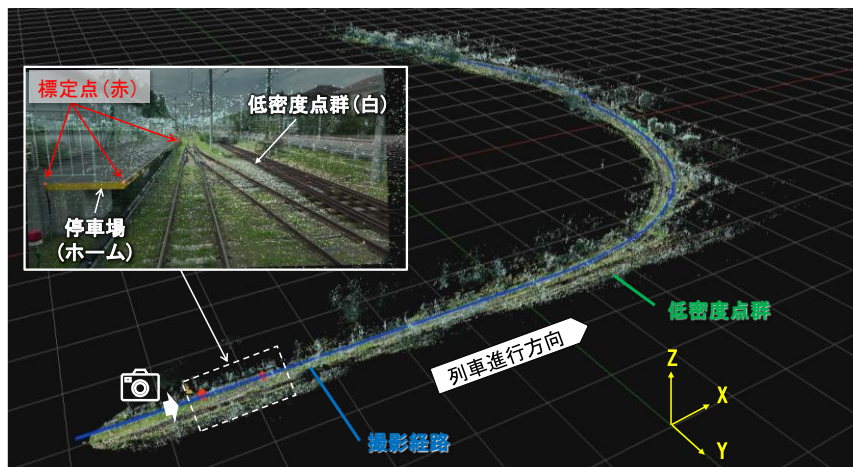
定と、軌道および線路周辺の3次元空間モデルの作成を行うことができる。本研究では、携帯情報端末で取得した列車前方動画の活用方法として、SfMによって推定された列車前方動画の撮影経路の利用と、SfM-MVSによって作成された3次元空間モデルを利用した寸法計測の可能性について検討した。

以降の検討では、前章までの検証結果を踏まえ、SfM解析時間を低減しながら低密度点群を効率的に作成できる条件として、Full HD画質で撮影した列車前方動画から30fpsで抽出した画像フレームをSfM-MVSに適用した。なお、SfMで得られる3次元情報は、任意の点を基準とした相対的な座標系に基づいており、スケールが不定である。そこで、後述するように列車前方動画で視認できる寸法が既知の標定点を用いて、SfMの結果に実物大のスケールを付与するジオリファレンスと呼ばれる処理を行っている。

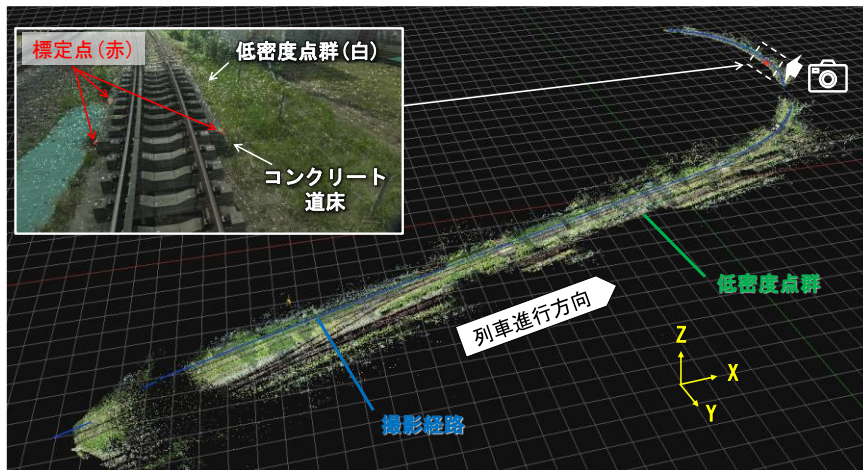
#### 4.1 撮影経路の活用

図8に、俯角 $9^\circ$ および俯角 $27^\circ$ の列車前方動画に対して、SfMで推定した列車前方動画の撮影経路と低密度点群の例を示す。各図には、列車前方動画から抽出した画像フレーム上に、ジオリファレンスに用いた3点の標定点を示している。これらの図に示すように、俯角 $9^\circ$ の場合は停車場(ホーム)の角部(図8(a))、俯角 $27^\circ$ の場合はコンクリート道床の角部(図8(b))に標定点を3点設定した。

図8(a)に示すように、俯角 $9^\circ$ の場合は、撮影経路と低密度点群が連続的に生成されていることがわかる。一方、図8(b)に示すように、俯角 $27^\circ$ の場合は、図8(a)と比較して撮影経路は不連続となり、低密度点群(特



(a) 俯角 $9^\circ$



(b) 俯角 $27^\circ$

図8 SfMで推定した列車前方動画の撮影経路と低密度点群の生成例

徴点)の未検出領域が多い傾向にあった。この要因として、俯角を大きく設けた場合は画像フレームの領域が軌道周辺に限定されるため、連続する画像フレーム間で特徴点の移動量が大きくなり、特徴点の検出に対する冗長性が低下した可能性が考えられる。また、特徴点の分布が軌道周辺に沿って平面的に分布したことで、カメラの内部標定要素や高さ方向の位置の推定精度が低下した可能性も要因として考えられる。

図9に、俯角9°の列車前方動画に対してSfMで推定した撮影経路と、携帯情報端末のGPSで取得した鉄道車両の移動経路の比較を示す。同図では、これらの位置情報を国土地理院の電子国土基本図<sup>14)</sup>(オルソ画像)上に表示している。同図より、SfMで推定した撮影経路はGPSで測位した走行経路と概ね一致し、比較的正確に撮影経路を推定できていることがわかる。一方、同図に示す踏切付近では、SfMで推定した撮影経路にドリフトが生じており、同地点以降の走行経路はGPSの測位結果とのずれが大きくなっていた。このドリフトが発生した箇所では、連続する画像フレーム間で共通する特徴点を検出できておらず、SfMの推定精度が低下していたと考えられる。

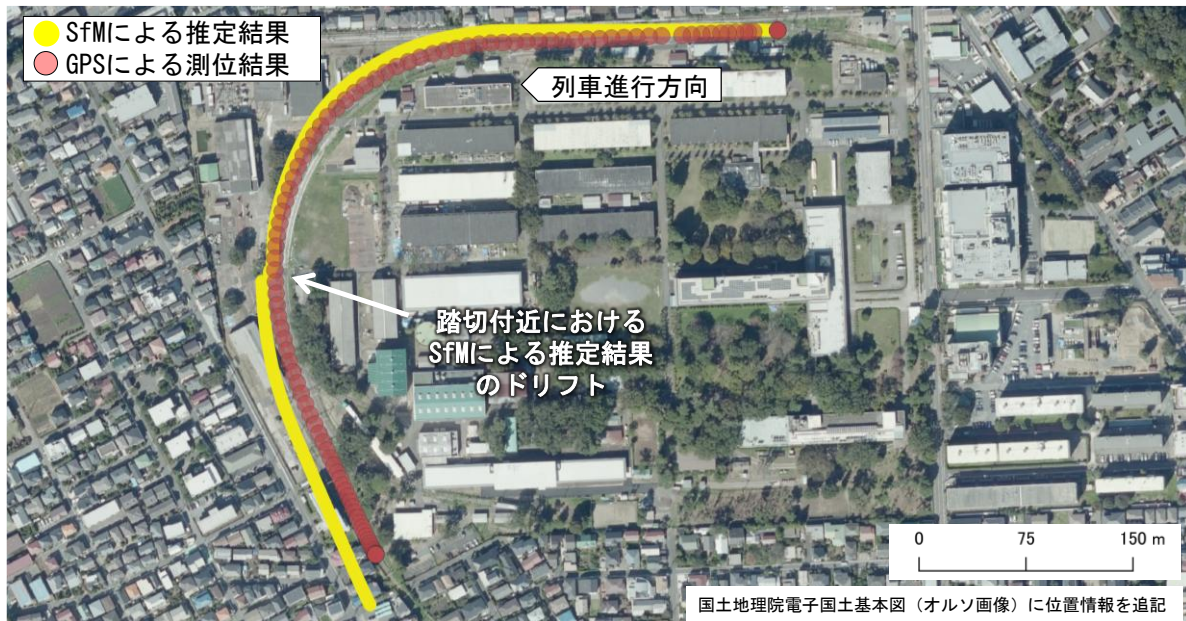


図9 SfMとGPSによる走行経路の比較例(俯角9°)

このように、SfM-MVSに適した俯角で撮影した列車前方動画を用いることで、鉄道車両の走行経路と軌道および線路周辺設備の3次元形状を一元的に把握できると考えられる。これらの情報を活用することで、線路の平面線形や線路設備の位置、寸法の把握が容易となり、線路設備台帳の整備を効率化できる可能性がある。

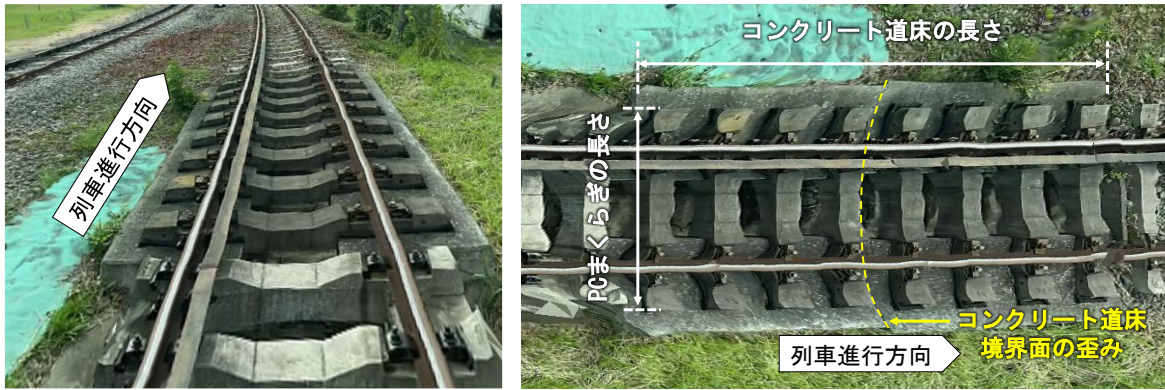
#### 4.2 3次元空間モデルを利用した寸法計測

SfM-MVSによって作成した3次元空間モデルの寸法精度を確認するため、試験区間に介在する寸法が既知の直結系軌道の部材を対象に、モデルの寸法と実測値の比較を行った。

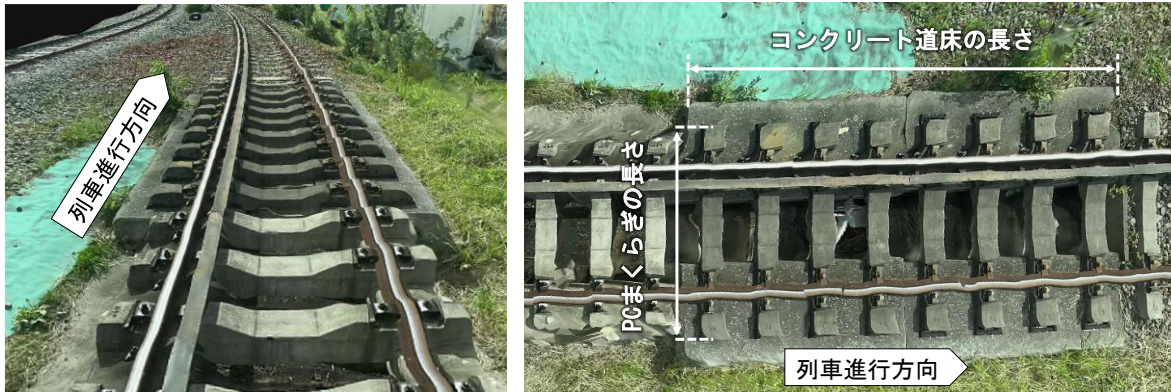
図10に、D型弾性まくらぎ直結軌道のテクスチャ付3次元メッシュモデルを示す。同モデルは、図8に示した低密度点群に対して、MVSにより作成した高密度なメッシュモデルである。同図に示すように、携帯情報端末の俯角によらず、作成したモデルはまくらぎおよびコンクリート道床の端部の位置を把握可能なメッシュサイズを有していた。

軌道各部の形状に着目すると、図10(a)に示す俯角9°の場合は、レールの歪みは少ないがコンクリート道

床の境界面に歪みが見られた。一方、図 10(b)に示す俯角 27° の場合は、俯角 9° の場合と比べてレールの歪みは大きいですが、コンクリート道床の境界面の歪みは小さかった。ここで、図 10 に示すコンクリート道床の長さ（実測値 4995mm）を 3 次元メッシュモデル上で計測した結果、俯角 9°（図 10(a)）の場合は 4960mm（誤差-35mm）、俯角 27°（図 10(b)）の場合は 4410mm（誤差-585mm）となった。同様に PC まくらぎの長さ（実測値 2000mm）を計測した結果、俯角 9°（図 10(a)）の場合は 1990mm（誤差-10mm）、俯角 27°（図 10(b)）の場合は 2150mm（誤差+150mm）となった。このように、俯角 9° の場合はいずれの寸法も実測値に対して 50mm 以内の誤差で推定可能であったが、俯角 27° の場合は俯角 9° と比べて実測値との誤差は大きくなった。これらの結果は、図 8 に示した SfM による撮影経路の推定結果を反映しており、俯角 27° の場合におけるカメラの内部標定要素の推定精度が不十分である可能性がある。したがって、3 次元空間モデルの寸法精度を向上させるためには、俯角に応じて標定点の配置や数量を適正化し、内部標定要素の推定精度を改善する必要があると考えられる。



(a) 俯角 9°



(b) 俯角 27°

図 10 D 型弾性まくらぎ直結軌道のテクスチャ付 3 次元メッシュモデル

図 11 に、俯角 9° の列車前方動画から作成した踏切周辺のテクスチャ付 3 次元メッシュモデルの例を示す。同図に示すように、作成したモデルは線路周辺にかけて地物の形状を復元できており、線路周辺における面積や体積の算出にも活用できる可能性がある。

以上に述べたように、3 次元空間モデルの寸法精度は携帯情報端末の俯角によって異なるが、携帯情報端末で撮影した列車前方動画であっても、SfM-MVS を適用することで一定の寸法精度で軌道および線路周辺の 3 次元空間モデルを作成可能であることを確認した。本手法で作成したモデルは、徒歩巡視や現場調査の補助あるいは代替手段として活用できる可能性がある。

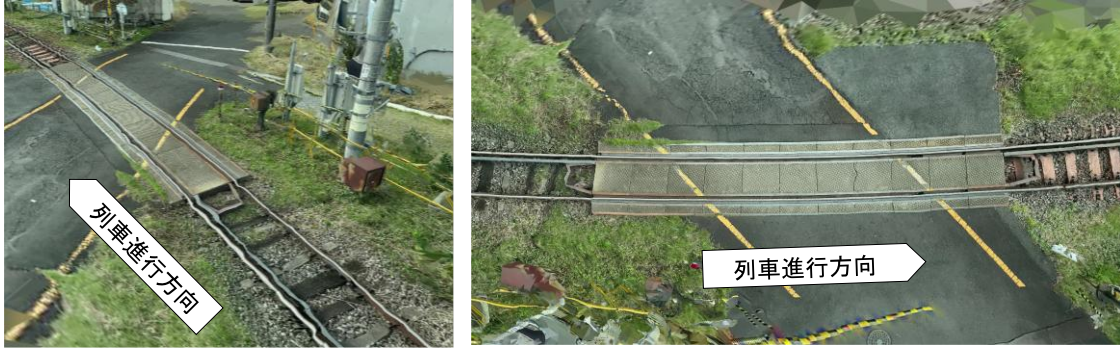


図 11 踏切周辺のテクスチャ付 3 次元メッシュモデルの例（俯角 9°）

## 5. まとめ

本研究では、携帯情報端末で取得した列車前方動画を軌道の維持管理業務へ活用するための基礎検討として、列車巡視支援アプリケーションで撮影した列車前方動画に SfM-MVS を適用し、軌道および線路周辺の 3 次元空間モデルを作成した。主な結果を以下に示す。

- (1) SfM の解析に要する時間は、列車前方動画の画像フレーム数を増やす（フレームレートを上げる）ほど指数関数的に増加する傾向が得られた。また、画像フレーム数が同等の場合は、列車前方動画の画質が高いほど増加する傾向にあったが、4K 画質と Full HD 画質の場合では解析時間の差異は限定的であった。
- (2) 3 次元空間モデルを構成する低密度点群の点群数は、列車前方動画の画像フレーム数を増やす（フレームレートを上げる）ほど対数関数的に増加する傾向が得られた。ただし、列車前方動画の画質が Full HD 以上の場合は、点群数に画質による大きな差異は見られなかった。
- (3) 列車前方動画（Full HD 画質）に SfM を適用した結果、列車の走行経路を一定の精度で推定できた。この結果と SfM-MVS で作成した 3 次元空間モデルを併用することで、線路の平面線形や設備の寸法・位置を一元的に把握することができ、線路設備台帳の整備を効率化できる可能性がある。
- (4) 列車前方動画（Full HD 画質）に SfM-MVS を適用し高密度な 3 次元メッシュモデルを作成した結果、モデルの寸法精度は携帯情報端末の俯角によって異なるが、軌道部材の寸法計測に対して一定の精度を有しており、現場調査の補助あるいは代替手段として活用できる見通しを得た。

今後は、SfM-MVS によって作成した 3 次元空間モデルの寸法精度を向上させる手法や、線路設備台帳の整備等への活用に向けた具体的な手法について、検討を進める予定である。

## 文 献

- 1) 土木学会・インフラメンテナンス（鉄道）特別委員会：鉄道インフラの健康診断と将来のメンテナンスに向けた提言，2020
- 2) 田中博文，趙博宇，蘇迪，長山智則：携帯情報端末を活用した低コストな列車巡視支援方法の開発，鉄道総研報告，Vol.39，No.1，pp.21-27，2025
- 3) 池内三津喜，田中浩平：スマートフォンを活用した線路保守システムの開発，サイバネティクス，Vol.28，No.1，pp.22-27，2023
- 4) 田中博文，蘇迪，長山智則：携帯情報端末を活用した低コストな軌道状態管理に関する基礎的検討，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.22，pp.39-46，2018
- 5) 篠田憲幸，網島均，松本陽，佐藤安弘，緒方正剛：携帯情報端末を用いた営業列車振動データにもとづく軌道管理手法，日本機械学会論文集，Vol.88，No.911，No.21-00375，2022
- 6) 三島健吾，川崎恭平，昆野修平，斉藤大樹，三和雅史：軌道の維持管理の省力化のための列車前頭画像による軌道状態管理法，

第 25 回鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.25, pp.123-130, 2021

- 7) 振津勇紀, 出口大輔, 川西康友, 井出一郎, 村瀬洋, 向嶋宏記, 長峯望: SfM-student:SfM 法を用いたデータ拡張による列車前方映像からのセマンティックセグメンテーション, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J105-A, No.4, pp.48-57, 2022
- 8) 織田和夫: 解説: Structure from Motion (SfM) 第一回 SfM の概要とバンドル調整, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.3, pp.206-209, 2016
- 9) 織田和夫: 解説: Structure from Motion (SfM) 第二回 SfM と多視点ステレオ, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.4, pp.259-262, 2016
- 10) 3Dflow 3DF ZEPHYR Documentation : <https://www.3dflow.net/technology/documents/3df-zephyr-documentation/> (参照日: 2025 年 8 月 26 日)
- 11) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準 (軌道編) の手引き, 2007
- 12) 梶原和博, 田中博文: 携帯情報端末で取得した列車前方動画に SfM-MVS 技術を適用した 3 次元空間モデルの作成, 第 29 回鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.29, pp.15-22, 2025
- 13) 板倉健太, 鎌倉以直, 細井文樹: ライダーおよび SfM を用いた地上における植生の 3 次元計測手法の比較研究, Eco-Engineering, Vol.30, No.1, pp.15-20, 2018
- 14) 国土地理院ウェブサイト: <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (参照日: 2025 年 8 月 26 日)