

列車巡視に活用可能な線路周辺画像解析エンジンの開発

清水 惇・昆野 修平

線路の保守状態や線路周辺環境の変化等を総合的に把握することを目的として、徒歩または列車に添乗して線路巡視が行われているが、従事員の減少や設備の老朽化を背景として、巡視等業務の省力化・効率化と線路周辺設備の安全確保の両立が求められている。これらに対して、営業車等の先頭に設置したステレオカメラで取得した画像を解析して列車巡視業務を支援するための技術開発を進めている。ここでは、列車巡視支援のための基礎技術として開発した線路周辺画像解析エンジンの概要について紹介する。

キーワード：列車巡視，画像解析，ステレオカメラ，3次元点群，支障物検知，建築限界，差分検知

1. はじめに

鉄道における列車巡視は、図-1に示すように、列車が安全に走行するために設備等を設置してはならない線路上の空間である建築限界に対する支障物の有無の確認や、線路周辺設備の保守状態の確認、沿線の環境変化を把握、といった線路の維持管理業務の一つであり、運転台に添乗する従事員の目視により実施される。しかしながら、近年の従事員の減少や設備の経年数の増加に伴って、上記列車巡視による処置必要箇所の選定から、処置の実施までの一連の業務に、省力化および効率化が求められている。

このような背景から、営業列車等の車両前頭に設置したステレオカメラ等から取得した画像を解析することで、建築限界等に対する支障物の有無や沿線の環境変化を自動で検出する線路周辺画像解析エンジンを開発した。本稿では、線路周辺画像解析エンジンの活用

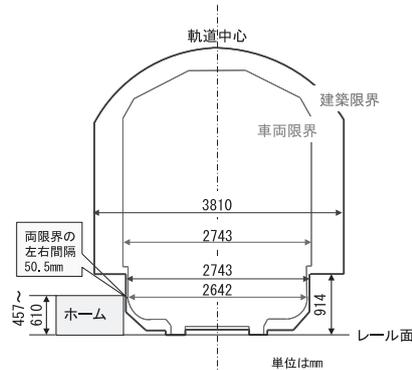
方法の概要と、本エンジンにおける画像処理の方法や適用例について述べる²⁾。

2. 線路周辺画像解析エンジンの概要

図-2に線路周辺画像解析エンジンを活用する方法の例を示す。本エンジンは、営業列車等の車両前頭に設置したステレオカメラから線路および線路周辺の画像を撮影し、その撮影画像に対して画像解析技術を活用して、建築限界等に対する支障物の有無や沿線の環境変化等を検出する。本エンジンを搭載した解析サーバに、走行車両上で撮影された画像を伝送・集積して、上記検出結果を事務所等のPCから確認することができる。

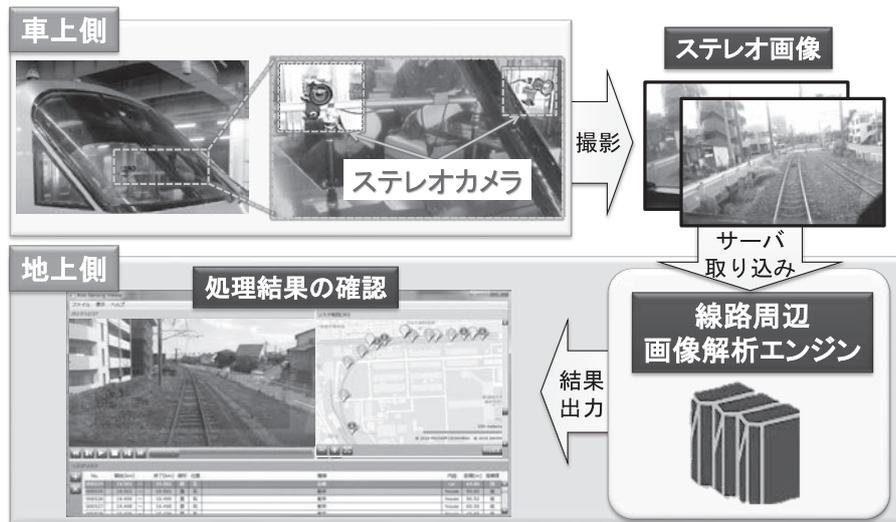
また、本システムでは、同時収録するGPS等の位置情報や列車の走行速度情報から、取得画像を撮影した位置やキロ程を特定することが可能である。これら

点検項目（保線系の例）
建築限界支障物の有無
材料の整理状態
近接工事の有無
線路諸標の状態
踏切の状態
フェンス設置状態
草木の繁茂状態



建築限界・車両限界の一例¹⁾

図-1 鉄道における列車巡視業務の概要



図一 線路周辺画像解析エンジンの活用方法

の位置情報を組み合わせることで、建築限界等に対する支障物や沿線の環境変化が検出された地点を特定できる。更に、本エンジンでは、後述する自己位置推定技術によって、GPS等の信号レベルが低下している場合や、上記位置情報や走行速度情報にノイズが含まれる場合においても、位置情報を補完して高精度な位置やキロ程の特定が可能である。

3. 線路周辺画像解析エンジンの構成技術

本章では、線路周辺画像解析エンジンを構成する、「自己位置推定」、「多視点ステレオによる3次元情報の生成」、「2時期画像の差分検知」の3つの画像解析技術の処理方法および適用例について述べる。

(1) 自己位置推定

本エンジンにおける自己位置推定は、ステレオカメラで撮影された画像（以下、ステレオ画像と言う）から、カメラの位置や姿勢の変化を推定する画像解析技術である。

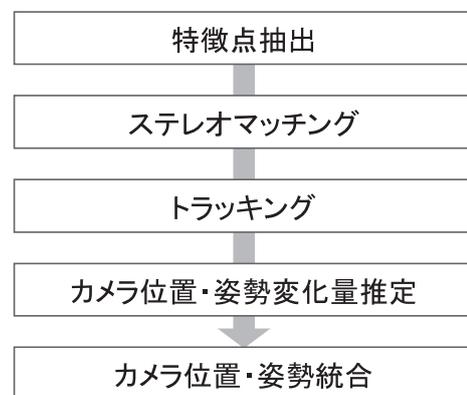
ここで、図一3に、本研究で開発した自己位置推定の処理フローを示し、各項目の詳細について以下に述べる。

(a) 特徴点抽出

連続する画像フレームで同一の被写体を特定するため、各画像フレームで特徴となる画素（特徴点）を、画像輝度値の二階微分の極大点探索によって抽出する。物体輪郭や物体色変化の端点といった比較的抽出し易い画素を探索する。

(b) ステレオマッチング

ステレオカメラの両画像で類似している特徴点同士



図一 自己位置推定の処理フロー

をペアとして対応付ける。特徴点の近傍画素や、近くに存在する特徴点間の位置関係により、類似性の判定を行う。

また、ステレオカメラ間の距離や両カメラの設置角度、画角などを予め計測（キャリブレーション）することで、ペアとして対応付けられた特徴点の画像上の位置関係を用いた三角測量により、カメラから特徴点までの距離を計算し、特徴点の3次元空間上の位置関係を計算できる。

(c) トラッキング

上記(a)で得られた特徴点を、隣り合うフレーム間に対応付けて、同一特徴点の時間方向の変化を追跡する。上記ステレオマッチングに記載した方法と同様の方法によって、前後のフレーム間で最も類似している特徴点同士を、同一の被写体であるとみなしてペアとして対応付ける。

(d) カメラ位置・姿勢変化量推定

上記(b)に記載の方法で算定するカメラと特徴点の間の距離と、上記(c)の特徴点のトラッキング結

果を利用して、カメラの位置・姿勢の変化量を求める。

(e) カメラ位置・姿勢統合

上記 (d) で算出した各フレームのカメラの位置・姿勢の変化量を積分して、カメラの位置・姿勢の経路を算出する。

これらの処理フローを適用し、営業車で取得した画像から、カメラの移動経路を山間の約4kmにわたって算出し、国土交通省の国土数値情報における線路の座標と比較した結果を図一4に示す。同図より、自己位置推定による算出経路は、線路の座標を捉えられていることが確認できる。また、線路長手方向における位置の誤差（進行方向に対するズレ量）は、最大で6.50mであり、GPS等の信号レベル低下により位置推定精度に変動が生じてても、本技術により走行経路の推定を補完できると考えられる。



図一4 自己位置推定による経路推定

(2) 多視点ステレオによる3次元情報の生成

本節では、ステレオ画像から3次元情報を生成する画像処理技術と、それを活用した建築限界等に対する支障物検知機能について紹介する。

(a) 処理方法

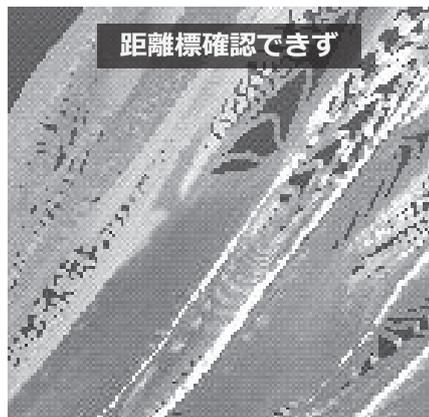
本エンジンでは、ステレオカメラによる一組の画像フレームから、三角測量によって、画像上の各画素の3次元空間上の位置関係を計算できる。この結果から、撮影したシーンの3次元情報を生成することが可能である。これに加えて、(1)節で述べた自己位置推定技術を活用することで、各画像フレームにおける3次元情報の計算結果とカメラの動き（位置や姿勢の経時変化）の推定結果から、多視点ステレオによる高密度かつ広範囲な3次元情報の生成が可能である。

本エンジンのような多視点ステレオによる3次元情報の生成技術はカメラのみを入力デバイスとするため、LiDAR等の他の3次元情報の生成技術と比べて、計測システムが安価でコンパクトであるという利点がある。一方、画像データはGPSや慣性センサ等の入力デバイスの取得データと比べてデータサイズが大きいいため、高精度な3次元情報の生成のためには、計算量

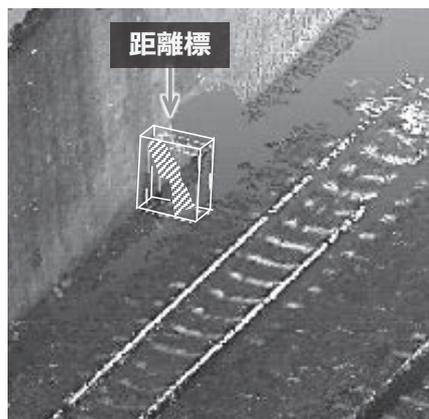
が多く、計算時間が長くなりやすいという欠点がある。

(b) 精度検証

図一5に、1フレームのステレオ画像による3次元情報の生成結果と、上記の多視点ステレオによる3次元情報の生成結果を示す。同図より、1フレームのみでは、キロポストの3次元形状を生成できていないが、多視点ステレオでは、3次元形状を捉えられている。



①1フレームによる結果



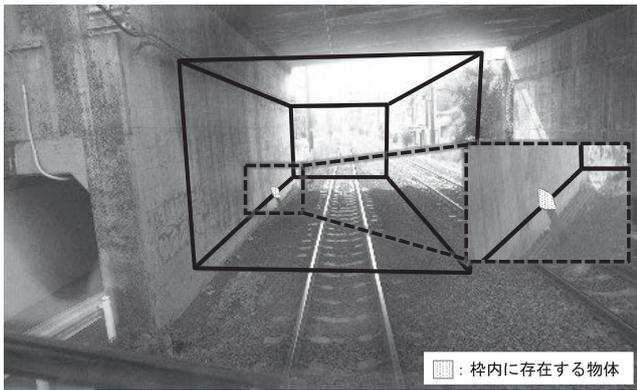
②多視点ステレオによる結果

図一5 3次元情報の生成精度の比較

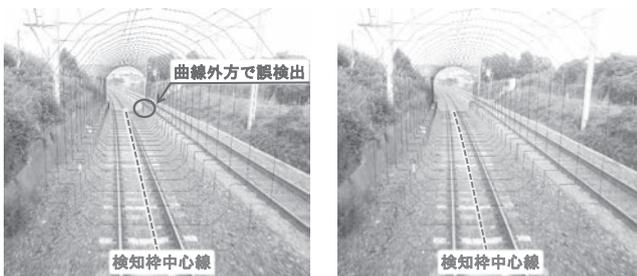
また、多視点ステレオによる3次元情報の生成精度の検証のため、多視点ステレオによって生成した3次元空間上でホームの高さ・離れ距離を計測したところ、レーザー式測定装置での計測値に対して平均1% (17mm)程度の誤差で計測可能であることを確認した³⁾。

(c) 支障物検知機能

上記の方法で生成した線路周辺の3次元点群に対して、線路長手方向に設定した建築限界等の枠内に、3次元点群が含まれているか判定することで、図一6に示すように、建築限界等を支障する物体を検知する機能を実現する。また、図一7に示すように、映像から線路形状を推定し、物体検出範囲の列車進行方向の



図一六 3次元空間における沿線の物体検出



図一七 物体検出における線路形状推定の適用

形状を曲線に応じて湾曲させることで、線路形状を考慮して支障物の検知が可能である。

(3) 2 時期画像の差分検知

本エンジンにおける差分検知は、撮影時期が異なる 2 枚の画像を比較して、その相違箇所を出力する技術である。線路沿線の環境変化、設備の変状、線路付近の異物の存在等を把握するのに活用される⁴⁾。

このような差分検知の画像処理技術は、街中の監視カメラや製造業における不良品判定等の分野でも用いられる。ただし、これらは固定されたカメラによって撮影される画像を対象とするのに対し、本エンジンは移動を伴いながら撮影した画像を対象とするため、例えば、2 時期の画像の間で撮影位置の対応をどれだけ上手くとったとしても完全に同じ位置から撮影した画像同士を比較することができない。このため、比較する 2 枚の画像間でシーンの死角や見映えがわずかに変化する。また、2 時期間で撮影時間帯や天候等が異なり、日照条件が変化することも想定される。上記のような変化は列車巡視において確認の対象とする環境等の変化ではないため、本研究ではこのような変化の影響を補正した上で差分を計算する必要がある。

本節では、開発した差分検知技術を構成する画像処理の各方法について、適用する順番に沿って説明する。なお、本エンジンの差分検知技術は、ステレオカメラによる撮影を必須とせず、単眼のカメラによる取

得画像に対しても機能する。

(a) フレーム間の対応付け

ある時期に撮影された画像(テスト画像)の各フレームに対して、異なる時期に撮影された基準画像(リファレンス画像)の全フレームの中から撮影位置が最も近いフレームを探索する。

ここで、異なる時期に撮影した画像は天候等の影響によって日照条件が異なることが想定されるため、後段の処理で安定した解析を行うために、同じ照明条件であるように画像の輝度を正規化する。次に、各画像で特徴点を抽出し、各特徴点の周辺画素や特徴点間の位置情報に基づいてフレーム間の類似度を計算し、このフレーム間マッチングで、類似度が最も高いフレーム同士を対応付ける。

(b) 画素配置の幾何近似補正 (ワーピング)

上記のフレーム間の対応付けの処理方法によって、2 時期間で最も近い位置同士でフレーム間の対応付けを行っても、シャッタータイミングの微妙な違いによって、微小な位置ズレが生じ得る。

そこで、上記の方法で算出した対応する 2 枚のフレーム間のオプティカルフローを推定する。オプティカルフローは、一般に、動画内の隣り合う 2 枚のフレーム間で、各画素が、どの方向にどれだけ移動したかをベクトルで表すものであるが、本エンジンでは、位置の対応を取った撮影時期が異なる 2 枚のフレームに対して、微小な位置ズレを画像上で幾何的に補正するのに用いる。具体的には、推定したオプティカルフローを用いて、リファレンス画像をテスト画像の画素配置に近くなるように幾何近似補正 (ワーピング) する。

(c) 被写体識別による不要な差分の棄却

画像上の差分として現れるが、列車巡視において検知が不要な差分として、植物の揺らめきや沿線の自動車・歩行者等が挙げられる。このような画像上の差分を棄却するために、1 枚の画像フレームを被写体の種類に応じて領域分割する方法 (セマンティック領域分割) を、ニューラルネットワークを用いた深層学習モデルにより実装した。

図一八に、被写体識別の適用結果の例を示す。同図より、レールやバラスト、植物等の分割が良好にできていることを確認できる。また、図一九に、被写体識別を適用した差分検知の出力例を示す。同図のように、対象外と設定した被写体の種類に合致する画像上の差分を、検知結果から除外できる。また、本方法によれば、学習に使用する教師データを追加することで、さまざまな被写体の種類を追加することが可能である。

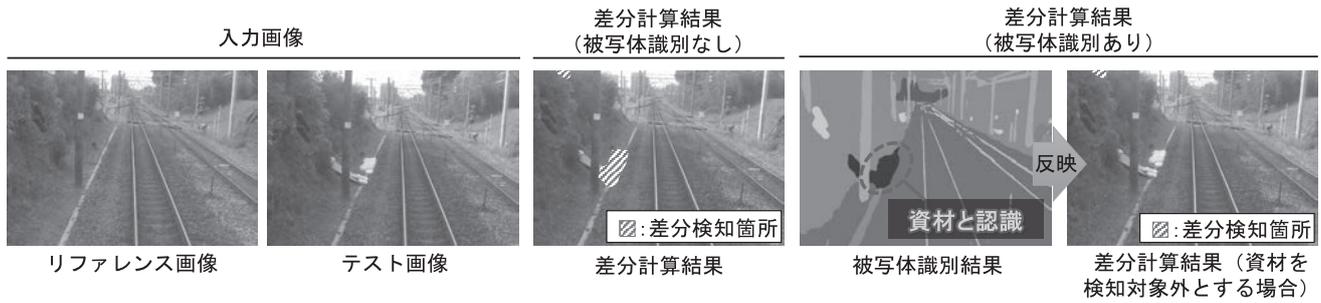


図-9 被写体識別を組み合わせた差分検知



図-8 被写体識別の適用例

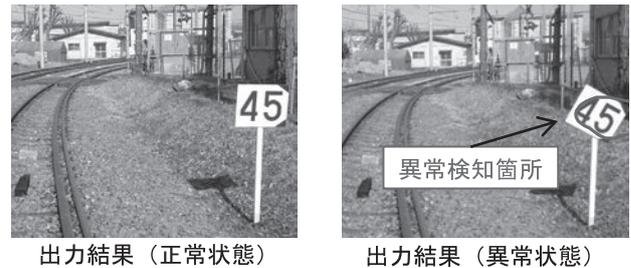


図-10 有意な異常の検知結果

テレオによる3次元情報の生成」, 「2時期画像の差分検知」の3つの画像解析技術から構成され, 建築限界等に対する支障物の有無や沿線の環境変化を自動で検出する機能を実現する。本エンジンの活用により, 巡視業務の省力化や高精度化に貢献したいと考えている。

本研究の一部は, 国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

JICMA

(d) 異常状態の学習による有意な異常の検知

上記の不要な差分の棄却のための処理, ワーピングや輝度正規化といった過検知抑制のための処理によって, 軌道の管理において本来検知すべき異常状態を見逃してしまうことが想定される。また, 標識や電柱等が徐々に傾いていく場合のように, 異常状態が徐々に進展する場合に対して, 差分検知による把握は困難である。

そこで, ニューラルネットワークを用いた深層学習モデルによって, 想定される正常・異常状態を予め学習させて, 画像上の異常状態を能動的に検知する処理を開発した。

図-10に, 本処理を適用して標識の異常を検知した例を示す。同図より, 標識の傾きを異常状態として検知できていることを確認できる。

4. おわりに

営業列車等の車両前頭に設置したステレオカメラ等から取得した画像を対象とする画像解析技術によって, 列車巡視を支援する線路周辺画像解析エンジンを開発した。本エンジンは, 「自己位置推定」, 「多視点ス

【参考文献】

- 1) 芳賀昭弘, 榎本衛, 石塚弘道, 新井泰, 高井秀之: ホーム付近の建築限界と車両限界の変遷, 鉄道総研報告, Vol.25, No.1, pp.49-54, 2011
- 2) 昆野修平, 川崎恭平, 三島健吾, 三和雅史, 清水惇, 中島昇: 列車巡視支援のための線路周辺画像解析エンジンの開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.3, pp.5-10, 2022
- 3) 川崎恭平, 三和雅史, 清水惇: 列車巡視の省力化のための画像解析技術の開発, 日本鉄道施設協会誌, Vol.58, No.12, pp.902-905, 2020
- 4) 三島健吾, 川崎恭平, 昆野修平, 齊藤大樹, 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, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.25, pp.123-130, 2021

【筆者紹介】



清水 惇(しみず あつし)
(公財) 鉄道総合技術研究所
軌道技術研究部 軌道管理
副主任研究員



昆野 修平(こんの しゅうへい)
(公財) 鉄道総合技術研究所
軌道技術研究部 軌道管理
研究員