

画像による地上からの車両床下状態確認手法

小島 崇* 宮原 宏平* 風戸 昭人* 鵜飼 正人**

Automating Visual Inspection for Underfloor Equipment of Railway Vehicles Using On-Track Cameras

Takashi KOJIMA Kohei MIYAHARA Akihito KAZATO Masato UKAI

The authors developed an image capturing system and a diagnosis algorithm for automating visual inspection of underfloor equipment of railway vehicles. The developed system consists of a line scan camera, line lights, a laser Doppler velocimeter and a computer, to scan passing vehicles from the ground. Test results using real vehicles indicate that the system can obtain detailed continuous images of the side of vehicles. The proposed algorithm using template matching and subtraction is designed to be robust against disturbances. The algorithm was tested on images captured under simulated variations in weather and the stain of underfloor equipment. As a result, the algorithm diagnosed, for example, whether the valve was fully open normally with an accuracy of AUC 0.990.

キーワード：車両検査，外観検査，画像解析，ラインセンサカメラ，テンプレートマッチング

1. はじめに

鉄道車両は安全に運転できる状態で使用するために、一定の期間や走行距離に応じた車両の検査を鉄道事業者において定めて実施している。車両の検査のうち、列車検査または仕業検査（以下、「仕業検査」と記す）は、車両の種類などにより定めた2～10日程度の周期で、列車として運転できる状態で行う。ブレーキなどの機能を確認するほか、主要部分の状態を外観や音などで確認する。外観の検査は現在、作業員が各部を目視することにより行われている。この外観検査を自動で行うことができれば、車両の検査の省人化や省力化が期待できる。仕業検査における車外の外観検査箇所は、床下機器に集中している。そこで本研究では、仕業検査における床下機器の目視確認箇所を対象に、画像を用いて自動診断する手法を検討し、撮影手法および検査アルゴリズムを開発した。

2. 撮影手法の検討と撮影装置の開発

2.1 撮影手法の検討

仕業検査における床下機器の検査は、車両の側面から作業員が確認できる箇所を対象に行っている。そのため、地上に固定したカメラで、通過する車両の床下機器の側面を連続的に撮影することにより、検査に必要な画像を効率的に取得できると考えられる。そこで、図1に示す撮影手法を提案した。レーザドップラ速度計により、通

過する車両の速度を非接触で計測し、車両の移動距離に対応した等距離間隔のパルスを送信するラインセンサカメラに出力する。ラインセンサカメラは、このパルスが入力されたタイミングで車両側面の1ライン分の画像を撮影し、その画像を横方向につなぎ合わせて2次元画像を生成して記録用コンピュータに送信する。記録用コンピュータは、受信した画像を保存する。ライン照明は、撮影箇所を線状に照らす。これによって、走行速度の変動に左右されない連続画像が得られる。

2.2 撮影装置の仕様検討

撮影装置の仕様を検討するため、図1に示した撮影機

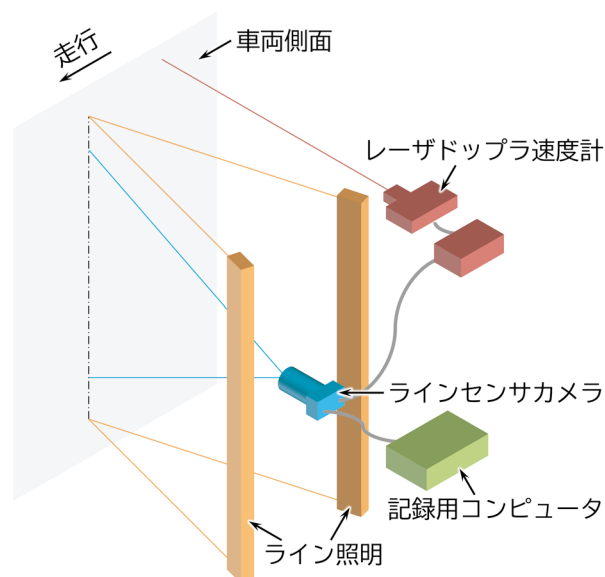


図1 車両床下撮影装置の機器構成

* 車両技術研究部 車両運動研究室

** 旧 信号・情報技術研究部 画像・IT研究室

器を用いて条件を変えながら実車両を撮影する試験を実施した。一般に画像検査の性能は照明に大きく依存するため、本試験では、照明とカメラの向きが平行に近い「順光」(図2 (a)), 水平方向に角度を持った「片側斜光」(図2 (b)), 同様の角度で両側に照明を配置した「両側斜光」(図2 (c)) の3条件で撮影した。

撮影画像の例を図3に示す。順光では、図3 (a)に示すように、照明が正反射する部分に白飛びが発生した。特に、床下機器表面の汚れが少ない車両で顕著であった。白飛びを防ぐために露出を下げて撮影すると、ほかの部分が黒つぶれした。白飛びや黒つぶれは撮影後に補正できないため、状態確認に必要な情報が失われる可能性がある。

これに対し、片側斜光では、主に拡散反射による光を捉えるため、床下機器表面の汚れの少ない車両であっても白飛びはほとんどみられなかった。一方、図3 (b)に示すように、手前にある部品や凸部に遮られて照明の反対側に影が生じる。一般に片側斜光は、きずなどの凹凸の検出に適しているが、床下機器のように奥行き深い対象物では、影の影響を大きく受けるため、その部分の検査が困難になることが懸念される。

両側斜光では、片側斜光に比べ、わずかな凹凸は見えにくくなるものの、片側斜光で生じたような顕著な影はみられなかった。そこで、床下機器の画像検査に適した照明として、図2 (c)に示す両側斜光を選定した。このほか、良好に撮影できる各機器の仕様や配置などを選定した。

2.3 撮影装置の試作

選定した仕様で撮影機器を一つの筐体に納める構造を検討し、図4に示す撮影装置を試作した。筐体は防滴構造とし、軌道側の全面を透明の亚克力板を用いた窓とした。レーザドップラ速度計は、本体が防水仕様であることと、撮影試験における条件設定の柔軟性を考慮し、本研究では筐体の上に配置した。

2.4 実車両の撮影による機能確認

試作した撮影装置を車両基地の屋外に仮設し(図5)、撮影装置の前を25km/h以下で通過する複数の車両形式の入換車両を延べ621両撮影した。天候は晴れであった。撮影後にヒストグラム均等化により輝度を補正した日中および夜の撮影画像の例を図6に示す。本試験の結果から、太陽光、車両通過速度、車両形式によらず、開発した撮影装置を用いて車両側面の精細な連続画像が得られることを確認した。

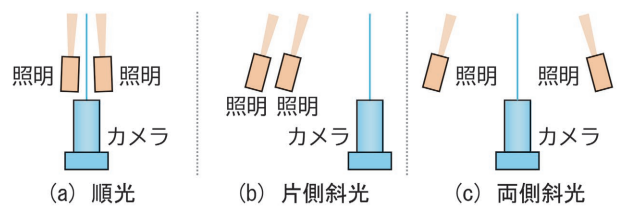


図2 照明条件(上から見た図)

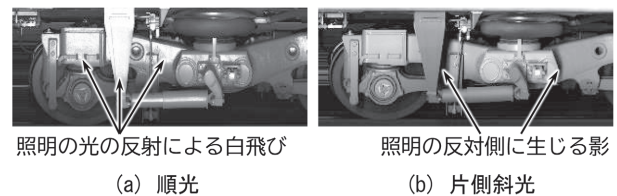


図3 照明位置による撮影画像の比較



図4 試作した車両床下撮影装置



図5 試作した撮影装置による撮影試験

3. 検査アルゴリズムの検討

近年、深層学習を用いた外観検査手法が多く提案されており、従来のルールベースの手法では困難な診断を可



(a) 日中（直射日光あり）



(b) 夜（日光なし）

図6 輝度補正後の撮影画像

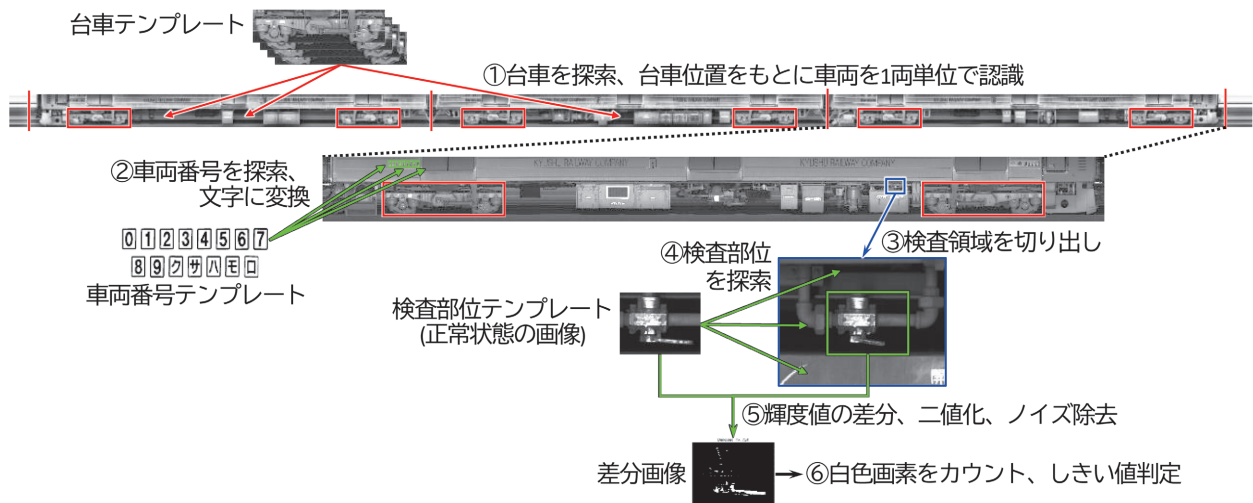


図7 検査アルゴリズム

能にしている。しかし、深層学習の特徴として大量の学習用画像を必要とするため、適用対象によっては、必要な診断精度を得るための十分な学習用画像を用意できない場合がある。一方、本撮影装置ではラインセンサカメラを用いた等距離間隔の撮影を行うため、対象物の大きさや角度がほぼ一定の均質な画像が得られることから、ルールベースの手法でも十分な検査性能が期待できる。そこで、本研究では、異常を模擬した車両を車庫内で撮影した画像を用いてルールベースのアルゴリズムを検討し¹⁾、テンプレートマッチングと差分を基本とした検査アルゴリズムを開発した（図7）。図中の丸数字に対応する説明を以下に記す。

- ① 撮影された一編成の床下側面の連続画像から、テンプレートマッチングにより台車を検出し、その位置をもとに車両を1両単位で認識する。
- ② 認識した車両1両ごとの撮影画像から、テンプレートマッチングを用いて、車体に表示された車両番号を認識する。
- ③ 車両番号に対して座標により定義した検査部位を含む領域を切り出す。
- ④ 切り出した領域に対し、あらかじめ用意した正常な検査部位の画像をテンプレートとしてテンプレート

マッチングを行い、検査部位の正確な位置を検出する。

- ⑤ 検出した検査部位の画像とテンプレートに対してヒストグラム均等化により輝度補正を行い、両者の輝度値の差の絶対値を計算し、二値化とノイズ除去を行う。これにより正常時と異なる部分が白く抽出される。
- ⑥ 表れた白色画素の数（以下、「差分画素数」と記す）を算出し、設定したしきい値より小さければ正常、しきい値以上であれば異常と判定する。

本論文では、③～⑥のアルゴリズムの検証について述べる。

4. 検査アルゴリズムの検証と改良

4.1 床下機器の異常模擬と撮影試験

試作した撮影装置を鉄道総研所内試験線の軌道脇に設置し、通過する試験車両の床下側面を撮影する試験を実施した（図8）。床下機器の異常を模擬するため、模擬床下機器を試験車両の床下側面部分に取り付けた。模擬床下機器として、外観の特徴の異なる代表的な部品とその異常状態を選定し、コックの開閉（ハンドル角度）、

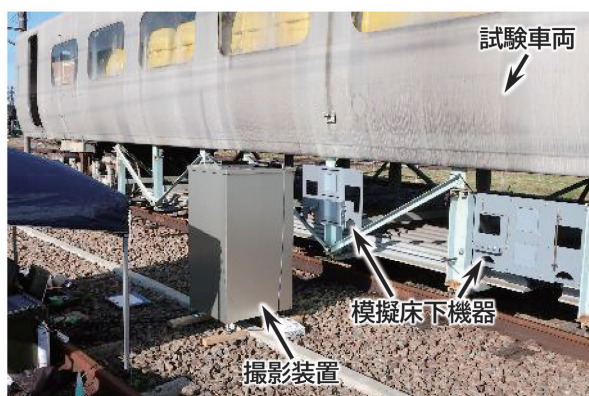


図8 床下機器異常模擬撮影試験

六角ボルト（以下、「ボルト」と記す）のゆるみおよび脱落，調整棒および配管の曲損，平板のきずおよびへこみを設定した（図9）。実使用で想定される正常時の外観の変化を模擬するため，模擬床下機器全体に汚れを想定して酸化鉄を付着させた条件を設定したほか，きずおよびへこみの設定箇所にチョークチェックを施した。天候変化の模擬として，検査部位に直射日光を当てた「晴れ」，当てない「曇り」，直射日光を当てず撮影装置の窓に霧吹きをした「雨」（図10）の3条件を設定した。また，撮影窓に土を付着させた「汚れ」条件を設けた。

4.2 アルゴリズムの検証

曇り条件の撮影画像から検査部位のテンプレートを作成し，提案したアルゴリズムを各撮影画像に適用した。本論文では，検査部位のうち最も多くの異常条件を設定



図10 雨条件の撮影装置の窓

したコックに対する結果を主に示す。

曇り条件の異常状態（ハンドル角度90°）に対する結果を図11（a）に示す。差分画像の主にハンドル部分が白色になっており，期待どおりハンドル角度の異常が適切に検出されている。差分画素数は5,996画素であった。

検査部位の一部にのみ直射日光が当たった正常状態（ハンドル角度0°）の結果を図11（b）に示す。差分画像の大半の領域が白色になっている。本アルゴリズムでは，撮影時の明るさの違いを補正するため，検査画像とテンプレートに対して輝度補正を施しているが，特に図11（b）に示す検査画像のように外乱光が一部分にのみ当たる場合，輝度補正によりその影響を抑えることは難しい。これによって，検査画像とテンプレートとの差分が大きくなった。差分画素数は，異常状態（図11（a））より多い46,060画素となった。このほか，コックの汚れの有無によっても著しい差分が生じることがわかった。この結果から，外乱光の変化や検査部位表面の汚れ

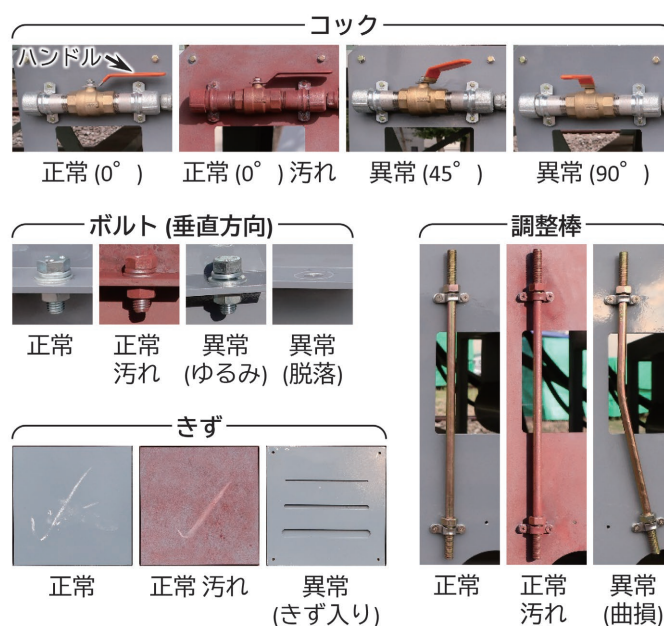


図9 模擬床下機器の条件設定の例
（一般のカメラで撮影した写真）

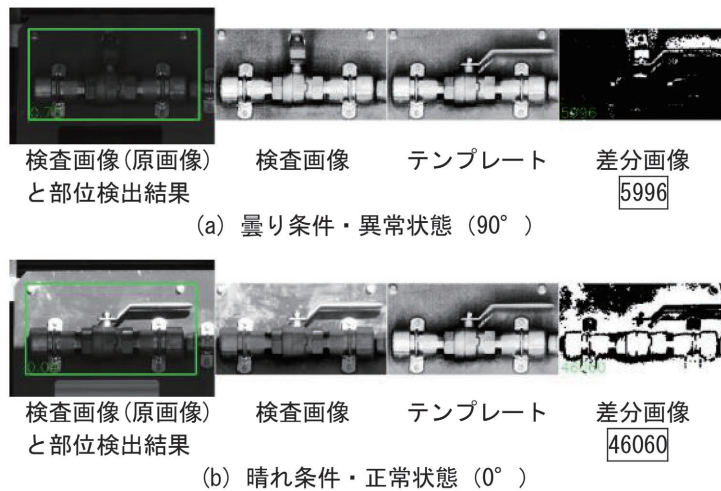


図 11 基本アルゴリズムによるコックの診断処理結果
(四角枠内の数字は差分画素数を表す)

状態の個体差など、検査部位の異常以外の外観の変化にアルゴリズムを対応させる必要があることがわかる。

4.3 アルゴリズムの改良

検査部位の異常以外の外観の変化の影響を抑える方法を検討し、アルゴリズムに以下の改良を加えた。

- (1) 複数のテンプレートの使用：検査部位の汚れや形状の個体差の影響を抑えるため、複数の車両から作成したテンプレートを用意し、検査対象画像に対してすべてのテンプレートでマッチングを行って、マッチングにおける類似度がもっとも高いテンプレートを選定する。
- (2) エッジ検出の追加：輝度の違いの影響を避け検査部位の形状の違いを検出しやすくするため、エッジ（輪郭）検出を用いる。エッジ検出は、検査部位のテンプレートマッチング（3章④・図7④）の前に、検査対象画像および検査部位のテンプレートに対して行う。
- (3) 差分評価領域の制限（マスク処理）：背景などの輝度変化による影響を排除するため、差分画素数を算出する領域を差分画像に設定する。

4.4 改良したアルゴリズムの検証

本論文では、複数テンプレートとして曇り条件におけるコックの汚れなしと汚れありの2枚、マスク処理としてハンドルの可動領域以外を除外する設定（図12）とした結果を示す。図11と同じ撮影画像に対して改良アルゴリズムを適用した結果を図13に示す。改良前のアルゴリズム（以下、「基本アルゴリズム」と記す）で差分画像の大半が白色になった晴れ条件の正常状態については、改良アルゴリズム（図13（b））では、差分画像の白色部分はわずかとなった。エッジ検出によって、検



図 12 マスク画像
(黒色=除外領域)

査画像とテンプレートの明るさの違いが排除され、さらにマスク処理によって、ハンドル以外のエッジの差が除外されたためと考えられる。正常状態の差分画素数は、異常状態の851画素より少ない301画素であり、期待通りの結果が得られた。

テンプレートに用いた画像を除くすべての撮影画像に対して改良アルゴリズムを適用して算出した差分画素数を図14に示す。本検討では、ハンドル角度15°以上を異常状態と定義した。図14から、ハンドルの角度が大きいほど差分画素数が大きい傾向がみられる。ハンドル角度15°以上を異常状態と定義し、しきい値を530に設定した場合、偽陽性率（正常な画像に対して異常と診断した割合）は1.5%、真陽性率（異常な画像に対して異常と診断した割合）は95.9%であり、良好な診断結果が得られた。

診断結果を評価するために、ROC 曲線（受信者動作特性曲線, Receiver Operating Characteristic curve）と AUC（Area Under the Curve）を用いた。ROC 曲線は、横軸を偽陽性率、縦軸を真陽性率として、異常と診断するしきい値を変えながら両者を計算してプロットしたものである。得られた曲線が、偽陽性率0、真陽性率1の点の近くを通るほど判別性能がよいことを表す。AUC は、ROC 曲線の右下部分の面積であり、値が大きく1に近いほど判別性能がよいことを表す。

差分画素数から計算した ROC 曲線と AUC を図15に示す。基本アルゴリズムの AUC は0.521であるのに対

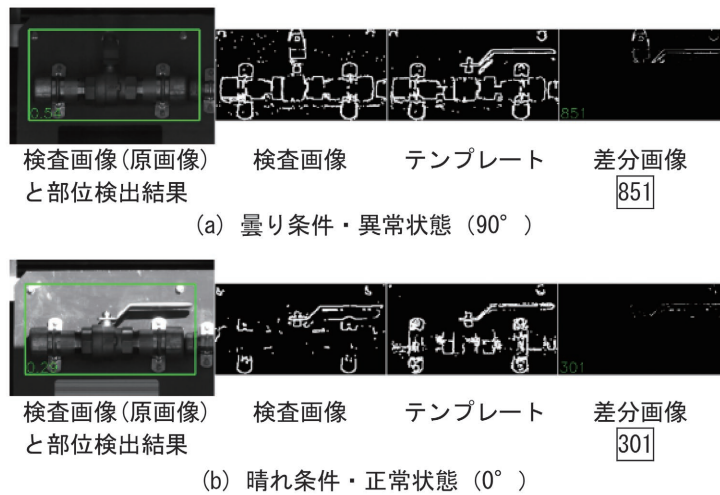


図 13 改良アルゴリズムによるコックの診断処理結果
(四角枠内の数字は差分画素数を表す)

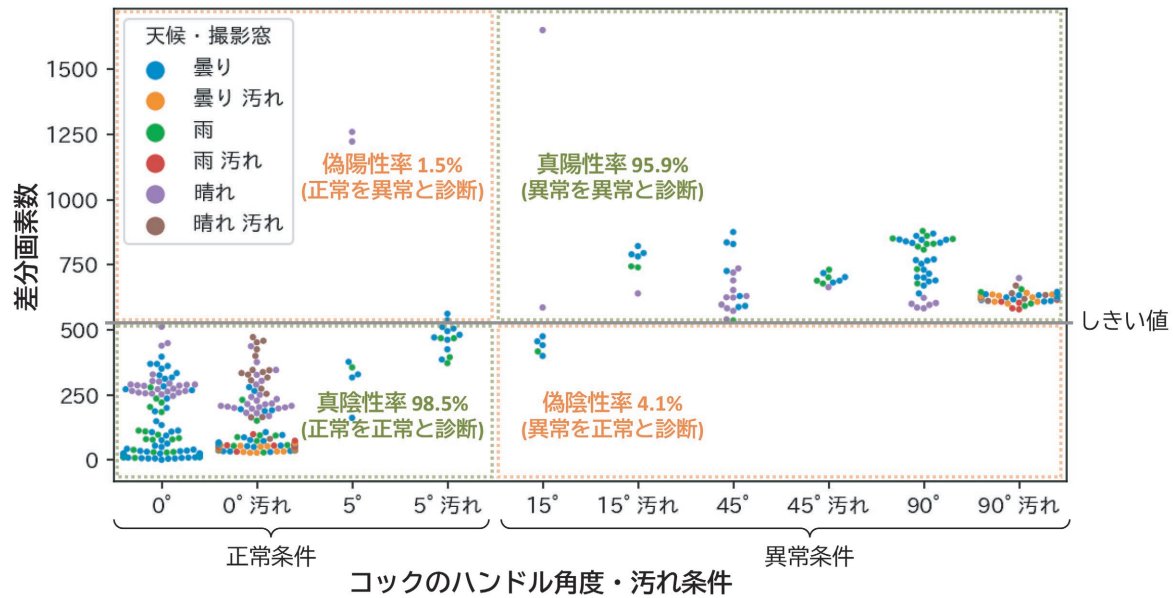


図 14 改良アルゴリズムにより各撮影画像から計算したコックの差分画素数

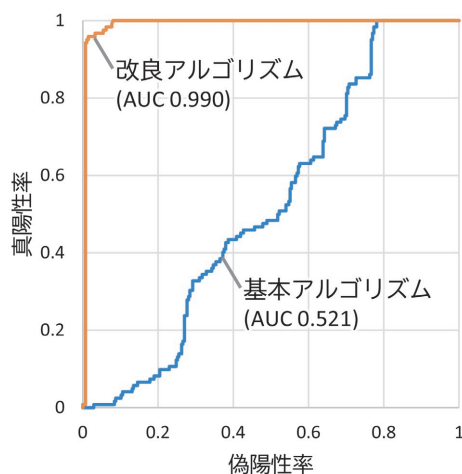


図 15 コックの診断の ROC 曲線

し、改良アルゴリズムの ROC 曲線の AUC は 0.990 であり、良好な判別性能があることがわかる。

テンプレート、エッジ検出、マスクの条件の組み合わせを変えて各検査対象に対して診断処理を行った。検査対象ごとにもっとも高い AUC が得られた診断処理条件と AUC の値を表 1 に示す。これらの結果から、検査対象に応じて処理条件を適切に選定する必要があることがわかる。本試験で模擬した床下機器の異常状態については、本アルゴリズムにより、ボルトのゆるみ、平板へのきず入りの診断は難しいが、コックの開閉、ボルトの脱落、調整棒や配管の曲損の診断は可能と考えられる。

表1 検査対象ごとの診断性能

検査対象	テンプレート数	エッジ検出	マスク	AUC
コック 開閉	2	あり	あり	0.990
ボルト (垂直方向) 脱落	1	なし	あり	0.982
ボルト (垂直方向) ゆるみ	1	なし	あり	0.865
ボルト (まくらぎ方向) 脱落	4	なし	なし	0.985
ボルト (まくらぎ方向) ゆるみ	4	あり	あり	0.909
調整棒 曲損	2	あり	あり	0.986
配管 曲損	1	あり	あり	0.961
平板 きず入り	1	なし	—	0.553

5. まとめ

本研究では、鉄道車両の仕業検査における床下機器の目視確認箇所を対象に、画像を用いて自動で検査する手法を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 走行する車両の床下側面を撮影する手法を検討し、ラインセンサカメラ、ライン照明、レーザドップラ速度計を用いた撮影装置を開発した。試作した撮影装置を車両基地の屋外に仮設して複数の入換車両を撮影し、良好な連続画像が得られることを確認した。
- (2) 上記の撮影装置で撮影した画像から検査部位ごとの正常状態の画像を作成し、それをテンプレートとして検査対象の撮影画像との輝度値の差分量から異常を検出する検査アルゴリズムを開発した。
- (3) 床下機器の異常および表面の汚れを模擬した試験車両を走行させ、天候条件を変えながら撮影する試験を実施した。テンプレートと検査対象画像と

で、日照や床下機器の汚れ状態が大きく異なる場合、輝度値の差分のみではその影響を顕著に受けることがわかった。

- (4) 複数のテンプレートとの照合、エッジ検出、マスク処理を検査アルゴリズムに加えることにより、日照や床下機器の汚れによる輝度変化の影響を抑制できることがわかった。上記(3)の試験で撮影したコックを診断した結果、AUC 0.990の判別精度が得られた。

本研究では、選定した代表的な床下機器を対象に、外乱を設定して診断性能を評価した。今後は、対象機器を広げて検証するとともに、撮影装置を長期間設置して実運用車両を撮影することにより、実環境における性能評価を行っていく。

また、本研究では、検査対象によらない汎用的な検査アルゴリズムについて検討した。検知が困難であった異常に対しては、検査対象の特徴に応じた検査アルゴリズムを開発する予定である。

謝辞

本研究における撮影試験の実施にあたり、九州旅客鉄道株式会社および西日本旅客鉄道株式会社の関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

文献

- 1) Kohei MIYAHARA, Takashi KOJIMA, Akihito KAZATO, "Development of anomaly detection method using railway vehicle side images," STECH2021, 2021.