

論文 線路周辺差分検知プログラムの暗所画像への適用拡大に向けた検討

昆野 修平¹・箕浦 慎太郎²・中島 昇^{3,4}

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: konno.shuhei.33@rtri.or.jp (Corresponding Author)

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: minoura.shintaro.51@rtri.or.jp

³日本電気株式会社 パイオメトリクス研究所 (〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753)
⁴NEC ソリューションイノベータ株式会社 デジタルソリューション事業部 (〒213-8511 神奈川県川崎市高津区北見方 2-6-1)
E-mail: nnakajima@nec.com

筆者らはこれまで、列車先頭からの撮影画像を活用して、軌道の維持管理業務を省力化するための線路周辺画像解析エンジンを開発してきた。本技術は、夜間やトンネル内の撮影画像（暗所画像）は適用の対象外であったことから、本技術の更なる展開には、暗所画像への適用拡大が必要不可欠であった。そこで、本エンジンを構成するプログラムの内、異なる 2 時期の撮影映像から線路沿線の環境変化箇所を自動抽出する差分検知プログラムの暗所画像への適用可能性について検証するため、夜間およびトンネル内で、モーターカーにカメラおよび近赤外線投光器を搭載して撮影試験を行った。その結果、取得した暗所撮影画像に対して適切なプログラムパラメータを用いることで、沿線障害物の有無を適切に検知できることを確認した。

Key Words: track patrol, image analysis, difference detection, night-vision, near infrared ray

1. はじめに

近年の保線従事員の減少や鉄道設備の経年化に伴って、軌道の維持管理業務に省力化・効率化が求められている。このような背景の下、筆者らは、列車先頭からの撮影画像を活用して、軌道の維持管理業務を省力化するための線路周辺画像解析エンジンを開発してきた。本エンジンは、ステレオカメラの取得画像からカメラの位置や姿勢の変化を推定する「自己位置推定」、上記自己位置推定の結果を利用して線路周辺の 3 次元空間情報を高精度に再構成する「多視点ステレオによる 3 次元点群の復元」、撮影時期の異なる 2 つの映像からその相違箇所を抽出する「差分検知」といった画像解析技術によって、図-1 に示す、建築限界支障物の検知機能や、沿線環境の差分検知機能を実現する^{1,2)}。

一方、本エンジンは、これまで明かり区間の撮影画像を適用対象に開発を進めてきたため、夜間やトンネル内の撮影画像（暗所画像）は適用の対象外であった。したがって、撮影可能な時間帯や区間に制約があり、本技術



(a) 建築限界支障物の検知



(b) 沿線環境の差分検知

図-1 線路周辺画像解析エンジンの機能

の更なる展開には、暗所画像への適用拡大が必要不可欠であった。

そこで、本エンジンの暗所画像への適用可能性の検証の第一段階として、エンジンを構成するプログラムの内、差分検知プログラムの暗所画像への適用可能性について検証した。具体的には、夜間およびトンネル内において、近赤外線投光器を用いて画像取得し、取得した画像を差分検知プログラムに適用して、沿線に設置した障害物の有無を検知できるかを調べることで、差分検知プログラムの暗所画像への適用可能性を検証した。

2. 差分検知プログラムの概要

画像処理技術の1つである差分検知技術は、撮影時期が異なる2枚のペアとなる画像を比較して、その相違箇所を出力する画像処理方法である。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。

このような差分検知は、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画像処理技術であるが、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している。対して、本プログラムの適用対象となる移動を伴いながら撮影する画像は、撮影時期ごとにシャッタータイミングが異なることから、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枚のペア画像間でシーンの見映えや死角がわずかに変化する。また、2時間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。そこで、これらの変化によって生じる画像上の差分を過検知しないように、2枚のペア画像間で幾何配置や輝度を近づける補正をした上で差分計算処理を行う。

本章では、列車巡視支援を目的に開発した差分検知プログラム¹⁾を構成する画像処理の各方法について、主なものを適用する順番に沿って説明する。

(1) 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。ここでの処理は、次の3つの手順から構成される。

a) 輝度の正規化

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。具体的には、各画像を小領域に

分割して、その領域内の輝度の頻度分布を算出し、リファレンス画像における分布の平均や分散等を用いて、テスト画像の輝度を正規化する。

b) 2画像のフレーム間マッチング

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する。ここでは、類似度が高いフレームの組み合わせを複数選択して、フレーム間の対応付けの“候補”として出力する。

c) 2フレームの順序・連続性補正

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と、特に高架区間や駅構内等の類似するシーンが連続する場合において、日照条件や画角の微妙な変動によって、撮影位置が離れたフレーム同士を対応付けてしまうケースが見られた。そこで、フレームの順序・連続性を考慮して、上記フレーム間の対応付けの“候補”の中から、順序・連続性に対する矛盾がなるべく生じないように、各フレーム間の対応付けを補正する処理を行う。

(2) 画素配置の幾何近似補正（ワーピング）

フレーム間の対応付けの処理方法によって、2時間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。

(3) 色情報を用いた差分計算

以上の方法で補正した2枚のペア画像間で、画像上の同一座標の画素とその近傍画素の不一致度を計算して、この不一致度が閾値を超える画素を画像上の差分検知領域として出力する。(1)、(2)の処理は輝度情報のみを使用しており、差分計算においても当初は輝度情報のみを使用していた。しかし、輝度情報のみを用いる差分計算では、輝度正規化処理が過剰に動作してしまうことにより、差分検知の性能が低下するなどの問題が見られた。

そこで、本プログラムでは、輝度情報だけでなく、CIELAB や CIE1976 (L^* , a^* , b^*) 色空間として定義される Lab 色空間²⁾を活用することで差分計算の性能を向上さ

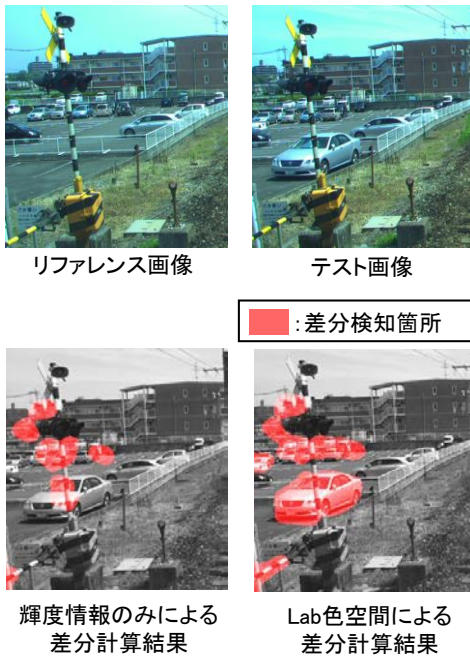


図-2 色情報を考慮した差分計算

せている。Lab 色空間は人間の知覚に近似するように設計された色空間であり、差分計算を Lab 色空間上で行うことで、人間の直感に近い色の差分を検知できる。

図-2 に、輝度情報のみを用いた差分計算と、Lab 色空間による差分計算の結果を示す。テスト画像とリファレンス画像の間には、沿線環境の変化として手前の自動車の有無等に変化が生じている。差分計算の結果を見ると、Lab 色空間を用いた方が、輝度情報のみを用いるよりも、上記変化を正確に検知できていることが確認できる。これは、輝度正規化によって自動車がアスファルトと同輝度に補正されたために、輝度情報のみでは自動車の有無を差分として検知できなかったが、Lab 色空間を用いることで人間の感覚に近い色の違いを差分として検知できたためである。

(4) 過不足抑制のための画像処理

a) 被写体識別による不要な差分の棄却

単純に画像上の差分を検知した場合には、例えば植物の揺らめき、雲、沿線の自動車や歩行者、バラストの微小な乱れ、信号の明滅などの軌道の管理上検知が不要なものまで検知されてしまう。このような画像上の差分を棄却するため、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、1枚の画像フレームを被写体の種類に応じて領域分割して、検知不要な対象を選択する。

図-3 に、被写体識別の適用結果の例を示す。同図のように、画像上の被写体を識別することで、差分検知箇所の物体種類を機械的に判断することが可能である。

b) 能動的な異常状態の検知

上述の不要な差分の棄却処理や、あるいは輝度の正規

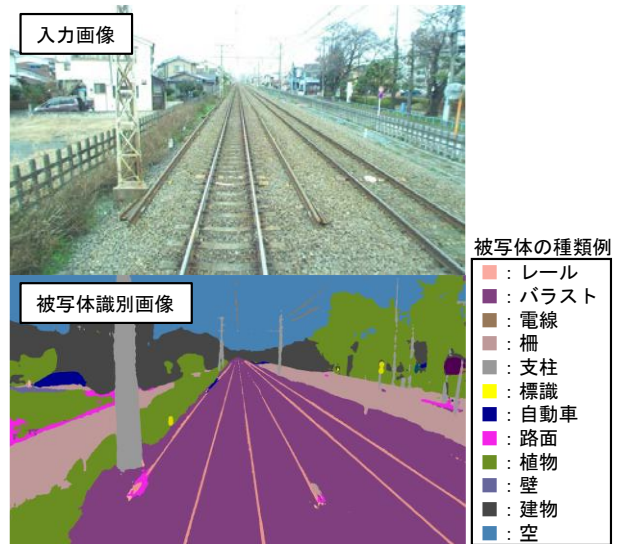


図-3 不要な差分の棄却のための被写体識別

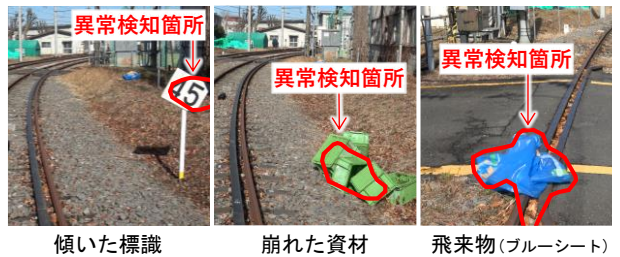


図-4 能動的な異常状態の検知例

化や幾何近似補正の処理によって、軌道の管理において本来検知されるべき異常状態を見逃してしまう可能性がある。そこで、本プログラムは、ニューラルネットワークの一種であるオートエンコーダーを用いた深層学習モデルによって、図-4 に示すように、標識の傾き等、画像上の異常状態を能動的に検知する機能を有する。

3. 暗所画像の差分検知プログラムへの適用可能性の検証

(1) 暗所画像の撮影方法

a) 使用機器・設置方法

図-5 に、夜間撮影時の機器設置の様子を示す。夜間撮影における撮影機器の構成は、本エンジンの開発で昼間撮影用に使用しているステレオカメラに、2台の近赤外線投光器を加えた構成とし、これらをモーターカーに設置した。表-1 に、使用した近赤外線投光器のスペックを、表-2 に、使用したカメラのスペックを示す。近赤外線投光器は、撮影シーン全体の概形を捉えるために広範囲型投光器を照射しつつ、撮影シーン中心部にはスポット型投光器を照射することで、レールや建築限界周辺の物体に対しては高精細な画像の取得を目指した。また、ステレオカメラに関しては、昼間撮影時は、人の目によって



(a) 撮影機器を設置したモーターカーの全景



(b) 撮影機器の接写

図-5 夜間撮影時の機器設置の様子

表-1 近赤外線投光器のスペック (メーカー公称値)

項目	広範囲型	スポット型
照射角度(水平方向)	120度	50度
照射角度(鉛直方向)	30度	30度
照射距離	65m	200m
寸法	W180×H280 ×D80 [mm]	W130×H170 ×D100 [mm]

表-2 カメラのスペック

解像度:	1920×1200 [px]
フレームレート:	15 または 30 [fps]
ゲイン:	自動調整 (0~10 [dB])
シャッタースピード:	自動調整 (50~700 [μs])
フォーカス:	20 [m]
焦点距離:	8 [mm]
絞り:	F2.8
寸法(カメラ1台):	W50×H50×D100 [mm]

捉えらえる可視光領域のみで画像取得するため、赤外遮断フィルタを用いて画像取得していたが、夜間撮影時は、人の目では捉えられない赤外光を画像で捉えるために、赤外遮断フィルタを外して撮影した。

なお、本試験はモーターカーを用いたが、表-1 および表-2 に示すように各機器は営業車両の運転台への設置も可能な寸法であるため、将来的にはこれらの撮影機器を営業車に取り付けることも想定している。

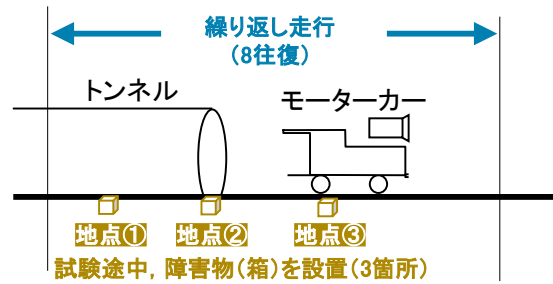


図-6 撮影場所・撮影条件の概況

表-3 撮影条件の詳細

試番	走行方向	赤外線投光器	前照灯 (可視光)	障害物	走行速度
1F	前向き	ON	ON	なし	20km/h
1B	後ろ向き	ON	OFF	なし	10km/h
2F	前向き	ON	ON	あり	30km/h
2B	後ろ向き	ON	OFF	あり	10km/h
3F	前向き	OFF	ON	なし	10km/h
3B	後ろ向き	OFF	ON	なし	10km/h

表-4 差分検知プログラムのパラメータの条件

輝度正規化	差分検知の感度
あり	強
あり	中
あり	弱
なし	強
なし	中
なし	弱

b) 撮影場所・撮影条件

図-6 に、本試験での撮影場所および撮影条件の概況を、表-3 に撮影条件の詳細を示す。撮影した線区は、単線かつ非電化である。撮影においては、「走行方向 (前向き走行か、後ろ向き走行か)」、「赤外線投光器の ON/OFF」、「前照灯 (可視光) の ON/OFF」、「走行速度」の条件に、線路近傍の 3 箇所に障害物 (箱) を設置して、「障害物の有無」の条件を加えて、これら条件を変更しつつ、繰り返し走行によって画像取得した。なお、進行方向に対するカメラの向き (起点方向きか、終点方向きか) は、同一となるようにした。

(2) 差分検知プログラムの適用条件

撮影した暗所画像に対して、差分検知プログラムで用いられるパラメータを変動させて、障害物の有無を差分検知プログラムで検知できるかを調べた。

表-4 に、用いたパラメータの条件を示す。1 つ目のパラメータは、2 章の(1) a) で示した輝度正規化に関するものであり、差分検知プログラムの入力を、輝度正規化の処理を施した画像のペアとするか、輝度正規化の処理をしていない画像のペアとするかを制御するものである。



(a) 赤外線 ON-前照灯 ON (試番 2F)



(b) 赤外線 ON-前照灯 OFF (試番 2B)



(c) 赤外線 OFF-前照灯 ON (試番 3F)

図-7 撮影した暗所画像 (照明条件別)

2 つ目のパラメータは、2 章の(3)で示した差分計算において差分検知箇所として出力する不一致度の閾値に該当し、差分検知の感度を決定する。本プログラムにおいて不一致度は画像上の各座標ごとに 0-255 で与えられ、本検討では $4 \cdot 12 \cdot 20$ の 3 段階の閾値を、それぞれ感度強・中・弱の感度パラメータとして用いた。なお、昼間画像に対する差分検知の適用例を示した既往の研究⁹⁾においては、「輝度正規化あり」、「感度中」のパラメータを用いていた。

なお、本検証では、暗所画像に対する差分計算の適用可能性を調べるのが目的のため、2 章の(4)で記した過不足抑制のための画像処理方法は使用しないこととした。

4. 検証結果

(1) 暗所画像の取得結果

図-7に、図-6の地点① (トンネル内) において取得した暗所画像を、近赤外線投光器および前照灯 (可視光) の照明条件別に示す。同図より、近赤外線投光器を ON の条件下では、前照灯の ON/OFF に関わらず、沿線に設置した障害物を含む線路周辺シーンを鮮明に撮影できて



図-8 図-7(a)に対応するペア画像 (試番 1F)

いる。一方で、赤外線を OFF、前照灯を ON の条件下では、軌道の形を確認できず、線路周辺シーンを撮影できていない。よって、トンネル内や夜間等の暗所の撮影においては、本試験で使用したような近赤外線投光器を用いた機器構成により画像取得するのが望ましいと考えられる。

(2) 差分検知プログラムの適用結果

図-7(a)に示した画像に対して、図-8に示す画像をペア画像として差分検知プログラムを適用した。図-9に、その適用結果をパラメータ条件別に示す。両画像とも「赤外線 ON-前照灯 ON」の条件下で取得した、地点① (トンネル内) の画像である。「輝度正規化あり」の結果を見ると、いずれの感度パラメータを用いても、障害物の有無を検知できていない。差分検知プログラムは画像上に大きく映る手前の物体の変化ほど検知されやすいが、特に「感度強」の場合において、手前の障害物の有無を検知できていないにも関わらず、遠方を誤って検知していることがわかる。これに対して、「輝度正規化なし」の結果は、「感度強」では、障害物の有無を含む画像の大半の領域を誤って検知 (過検知) しているが、「感度中」、「感度弱」においては、目立った過検知が発生せずに障害物の有無が検知されており、障害物の有無を「適切に検知」できていると言える。ここで、図-10に、図-8 (暗所画像) と図-2 のリファレンス画像 (昼間画像) における、彩度 (色の鮮やかさの尺度) のヒストグラムを示す。図-10より、暗所画像は昼間画像と比べて彩度に関する情報が少ないため、昼間の撮影画像に対して適用することを想定して作られた輝度正規化処理を暗所画像に対して施すと、同処理が過剰に働くことによって 2 画像間の物体の有無を検知できなかったと考えられる。

なお、図-9において障害物の有無を「適切に検知」できていると判定した差分検知の結果画像において、遠方にわずかに過検知が生じているが、これはカメラの前照灯の写り具合のわずかな違いによって生じたものであると考えられる。実用上は、このような遠方の過検知が発生している領域を検知対象外とすることで検知結果から除外することが可能である。さらには、画像を線路からの距離や 2 章(4) a) に示した被写体識別によって領域分割

し、領域ごとに感度等のパラメータを変更して差分検知をすることで、線路からの距離や被写体種別に応じた感度により適切な差分検知が可能になると考えられる。

また、比較対象とした2つのペア画像のうち、図-7(a)の画像(試番 2F)は走行速度 30km/h、図-8の画像(試番 1F)は走行速度 20km/h であり走行速度が異なるが、以上述べたように特定のパラメータを用いれば適切な差分検知できることを確認した。

表-5に、本検討の各照明条件・地点別の差分検知結果の判定一覧を示す。なお、「赤外線 ON - 前照灯 OFF」の地点①(トンネル内)の条件では、測定時の不良によって画像を取得できなかったため、検証の対象外とした。この条件を除く、計5パターンの条件で取得した暗所画像のペアと、参考のため、図-2で示した昼間撮影画像のペアによって、パラメータを変動させて差分検知プログラムに適用し、その適用結果を、図-9で確認したように、適切に検知できているかを判定した。同表より、昼間画像に対して通常用いる「輝度正規化あり」のパラメータを暗所画像に用いると、感度パラメータをどのように設定しても、ほとんどのケースで障害物を検知できないか

あるいは過検知する結果となった。一方で、「輝度正規化なし」とすると、特に「感度弱」において良好な結果が得られた。以上の結果から、「輝度正規化なし」、 「感度弱」のパラメータを用いることで、差分検知プログラムを暗所画像に対して適用することができると考えられる。

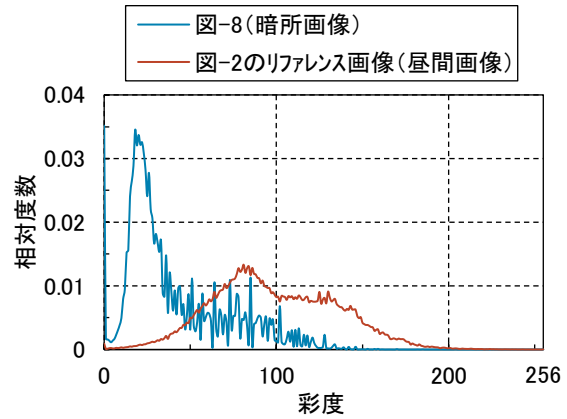


図-10 彩度のヒストグラム

		差分検知の感度		
		強	中	弱
輝度正規化	あり			
	なし			

図-9 差分検知結果(「赤外線 ON-前照灯 ON」, 地点①)。赤い領域は差分検知箇所, 青い領域は検知対象外を表す。

表-5 差分検知プログラムの適用結果の判定一覧

パラメータ		(参考) 昼間画像 (図-2)	赤外線 ON - 前照灯 ON(試番 1F-2F)			赤外線 ON - 前照灯 OFF(試番 1B-2B)		
輝度正規化	感度		地点①	地点②	地点③	地点①	地点②	地点③
あり	強	過検知	検知できず	適切に検知	過検知	測定不良により データなし	やや過検知	過検知
	中	適切に検知	検知できず	検知できず	検知できず		検知できず	検知できず
	弱	検知できず	検知できず	検知できず	検知できず		検知できず	検知できず
なし	強	過検知	過検知	過検知	過検知		過検知	過検知
	中	過検知	適切に検知	やや過検知	やや過検知		適切に検知	やや過検知
	弱	適切に検知	適切に検知	適切に検知	適切に検知		検知できず	適切に検知

5. おわりに

差分検知プログラムの暗所画像への適用可能性について検証した。本論文のまとめは次に示す通りである。

- (1) 夜間およびトンネル内で、ステレオカメラと近赤外線投光器を用いた暗所画像の撮影試験を実施した。その結果、近赤外線投光器を用いた機器構成とすることで、線路周辺シーンを鮮明に捉えられることを確認した。
- (2) 撮影した暗所画像を差分検知プログラムに適用して、沿線に設置した障害物の有無を検知できるか調べることで、プログラムで用いられる適切なパラメータを検証した。その結果、昼間画像に用いると良好な結果が得られる輝度正規化処理をせず、また、昼間画像よりも検知感度を弱くすることで、暗所画像に対しても適切に差分検知できることがわかった。今後は、昼間と夜間画像を組み合わせた差分検知の検証のほか、ステレオカメラの撮影画像による3次元点群の復元技術や建築限界支障物の検知機能(図-1(a))の夜間画像への適用拡大を課題とした研究に取り組んでいく予定である。

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。

REFERENCES

- 1) 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. [Konno, S., Kawasaki, K., Mishima, K., Miwa, M., Shimizu, A. and Nakajima, N.: Image Analysis Engine for Supporting Onboard Track Patrol, *RTRI Report*, Vol.36, No.3, pp.5-10, 2022.]
- 2) 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, No.25, pp.123-130, 2021. [Mishima, K., Kawasaki, K., Konno, S., Saito, D. and Miwa, M.: Track Condition Monitoring by Using Forward View Image for Work Saving of Track Maintenance, *Journal of Railway Engineering, JSCE*, No.25, pp.123-130, 2021.]
- 3) CIE 015: 2004, Colorimetry, 3rd edition.

(Received April 1, 2022)

(Accepted June 3, 2022)

STUDY OF APPLYING DIFFERENCE DETECTION PROGRAM FOR TRACK PATROL TO NIGHT VISION IMAGE

Shuhei KONNO, Shitaro MINOURA and Noboru NAKAJIMA

We have developed the image analysis engine to save labor in track maintenance operations. Since the engine was not applicable to images taken at night or in tunnels, it was essential to support night vision images for further development of the engine. In order to verify the applicability of the difference detection program, which automatically extracts environmental change along the railroad, to images in dark areas, we conducted a photography test at night and in a tunnel. As a result, it was confirmed that the presence of obstacles along the railroad can be adequately detected by using appropriate program parameters.