

運転台カメラからの線路外観を縮小模型試験線により再現する



長峯 望

Nozomi Nagamine

情報通信技術研究部
画像・AI研究室長



向嶋 宏記

Hiroki Mukojima

情報通信技術研究部
画像・AI研究室
主任研究員



松尾 佳周

Yoshichika Matsuo

情報通信技術研究部
画像・AI研究室
研究員



熊澤 宗一郎

Soichiro Kumazawa

情報通信技術研究部
画像・AI研究室
主任研究員



小室 翔嗣

Shoji Komuro

情報通信技術研究部
画像・AI研究室
研究員



桑原 昌平

Shohei Kuwabara

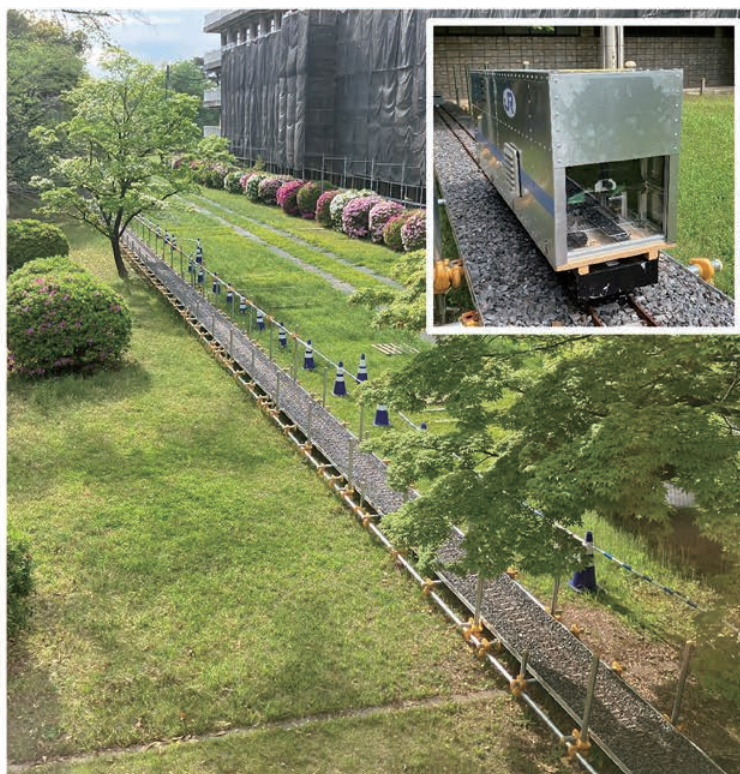
情報通信技術研究部
画像・AI研究室
研究員

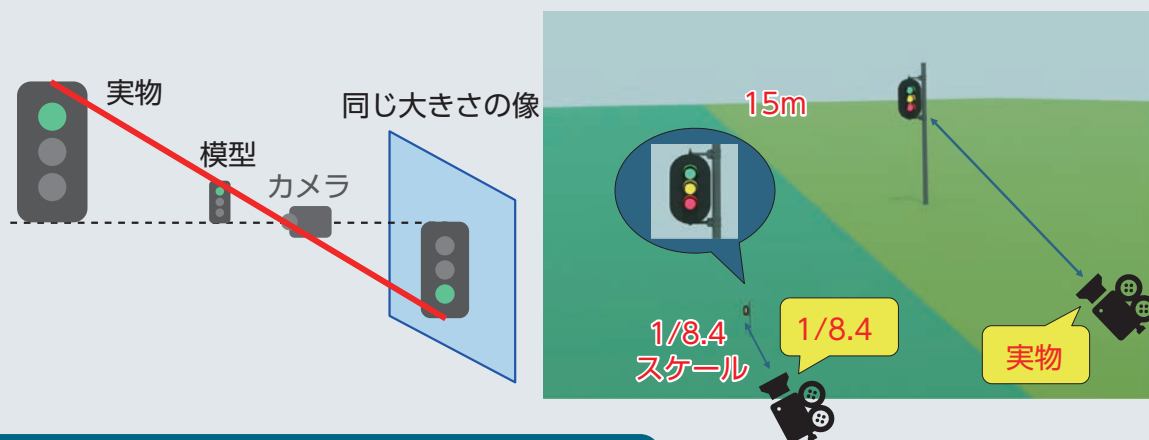
はじめに

近年のカメラやLiDAR（レーザー光を使って距離を測るセンサー）などのセンシング技術、およびAI（人工知能）の急速な発展を背景として、車両に搭載した監視装置で列車前方の支障物を自動的に検知する技術の研究開発が進められています。この技術は、運転士の前方の目視を支援するだけでなく、将来的には列車の自動運転における列車前方監視への活用が期待されています。

しかし、この列車前方監視技術の性能を正確に評価するためには、いくつかの課題がありました。鉄道事業者の営業線を利用する場合は、試験条件が大きく制限されます。安全上の理由から線路上に支障物を配置することは困難であり、走行試験も原則として数回に限られます。さらに、雨や霧、降雪といった悪天候条件を意図的に再現して試験を行うことは極めて困難でした。一方で、鉄道総研の試験線を利用する場合、直線区間は200m程度しかなく、一般的な

図1 縮小模型試験線の試験環境





相似則

カメラから物体までの距離と物体の大きさの比が同じであれば、カメラの投影面上に同じ大きさの像が形成されるという光学的な性質のことです。この性質を利用して、縮小模型と実物の映像上の見え方を等価にすることができます。

図2 相似則の原理（物体の距離と像の映り方）



図3 実際の信号機と縮小模型試験線の信号機の比較

信号機の見通し距離である600m先までの見通しを確保することができません。加えて、試験は屋間に限定され、長期的に線路を占有することも困難です。

このように、支障物の種類や環境条件を自由に設定した定量的な性能評価を行うことが難しいという課題を解決するため、我々は1/8.4スケールの縮小模型試験線を構築しました。本記事では、カメラから見る線路外観を再現する技術を紹介します。

縮小模型試験線の概要

縮小模型試験線は、鉄道総合技術研究所の敷地内に構築した屋外の試験設備です（図1）。全長約90mの直線区間を有しており、1/8.4スケールに換算すると実距離で約756m相当の距離をカバーしています。線路上にはレール、バラスト、信号機などの鉄道設備を約1/8.4の大きさで再現した模型を配置することで、実際の線路環境に近い外観を実現しています。また、

模型の車両にはカメラやLiDARセンサーを搭載可能であり、実際の車両と同様に前方の映像や3次元データを取得できます。

このサイズの縮小模型が有効である原理は、カメラ映像における「相似則」¹⁾にあります。カメラから物体までの距離と物体の大きさの比が同じであれば、カメラの投影面上には同一サイズの像が形成されます（図2）。つまり、実物を1/8.4に縮小した模型を、実物の1/8.4の距離に配置すれば、カメラ上では実環境と同等の映像を得ることができます。信号機のような発光体についても同様の原理が成り立ちます。光のエネルギーはカメラまでの距離の二乗に反比例するため、発光面積を1/8.4の二乗に縮小し、輝度を同一に保てば、カメラに届く光の明るさは実物と等価になります。実際に、信号機から15m相当の地点で撮影した映像を比較したところ、実物の信号機と模型の信号機で大きさや明るさが同等の見え方が得られることを確認しています（図3）。

霧発生装置

- 霧の濃淡を2段階で設定
- 煙の滞留時間は薬液の種類で変更可
- ファンの向き・強さで方向を調整可能



図4 霧の再現装置と再現の様子

悪天候の再現

縮小模型試験線は、降雨・霧・降雪といった悪天候を人工的に再現するための装置を備えています。

降雨の再現には、線路に沿って設置したスプリンクラーを使用しています。全長45m、幅0.8mの範囲に24台のノズルを配置しており、模型スケールで毎時3.4mmの降雨量を実現できます。この値を実スケールに換算すると毎時

約28.6mmに相当し、気象庁の区分で「強い雨」に相当する降雨条件まで再現が可能です。

霧の再現にはフォグマシンを使用しています(図4)。霧の濃淡は2段階で設定でき、霧の滞留時間は薬液の種類によって調整できます。また、ファンの向きや強さを変えることで霧の方向を制御できます。気象庁の濃霧注意報に相当する視程(前方をどのくらい遠くまで見通せるかを示す)100m以下の条件は、模型スケール

降雪装置

- 泡によって雪を模擬降雪による視界不良を再現
- 降雪量を調整可能



図5 降雪の再現装置と再現の様子

では約12m以下に相当しますが、この条件での視程距離を実験的に確認し、評価試験に活用しています。

降雪の再現にはスノーマシンを使用し、泡によって雪を模擬しています(図5(図下段は積雪は実物、降雪がスノーマシンによる再現))。降雪による視界不良の状態を再現でき、排雪量と排雪角度の調整によって降雪量を変化させることができます。実験では、排雪量40%の条件

で毎時2cmの積雪が得られており、実スケール換算で毎時16.8cmに相当します。

自動試験環境

縮小模型試験線上の車両は、自動で繰り返し走行することができます。走行中にカメラとLiDARで前方の映像と3次元データを常時取得しており、線路上に配置した支障物の模型(人物・自動車など)を検知すると、車両が自動的

表1 模型線路で行える試験の一覧

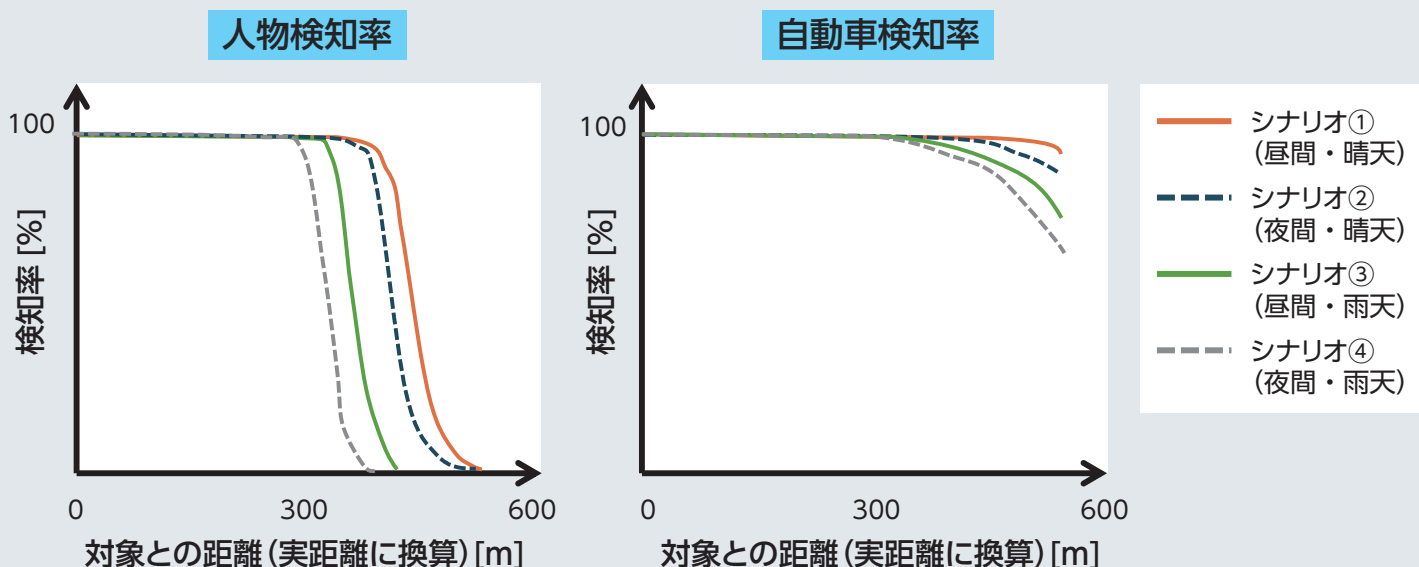
		所内試験線	営業線	縮小模型試験線
線形	600m以上の直線区間	×	△ (要調整)	○
	列車からの見通しがとれない曲線区間	○	△ (要調整)	○
被写体	線路内に静止している人／車／動物	○	×	○ (模型)
	線路に侵入・直前横断する人／車／動物	○	×	×
	落石・倒木	○	×	○
	線路陥没	×	×	○
	架線飛来物	×	×	○
	沿線火災	×	×	×
天候	雨	×	△ (気象条件次第)	○
	霧	×	△ (気象条件次第)	○
	雪	×	△ (気象条件次第)	○ (スノーマシン)
	西日	○	○	○
時間帯	夜間	×	○	○
列車の速度	90km/h	×	○	○
	130km/h	×	○	○
	急ブレーキ	×	×	○

に停止する仕組みを構築しています。

この自動試験環境によって、支障物の種類、支障物までの距離(600m相当まで)、天候条件(晴天・雨天・霧・降雪)、時間帯(昼間・夜間)といったさまざまな条件を組み合わせた試験を繰り返し実施できます。表1に、鉄道総研試験線、営業線、縮小模型試験線のそれぞれで実施できる試験項目を比較しています。模型環境で

は、600m以上の直線区間での試験、夜間試験、雨天・霧・降雪条件の試験など、他の環境では困難な多くの項目が実施可能です。特に、線路陥没や架線への飛来物の模擬など、安全上の理由から実際の線路上では再現が極めて難しい事象についても、模型上で安全に試験を行うことができる点が大きな強みです。

図6 今後予定している成果のイメージ(検知率の評価)



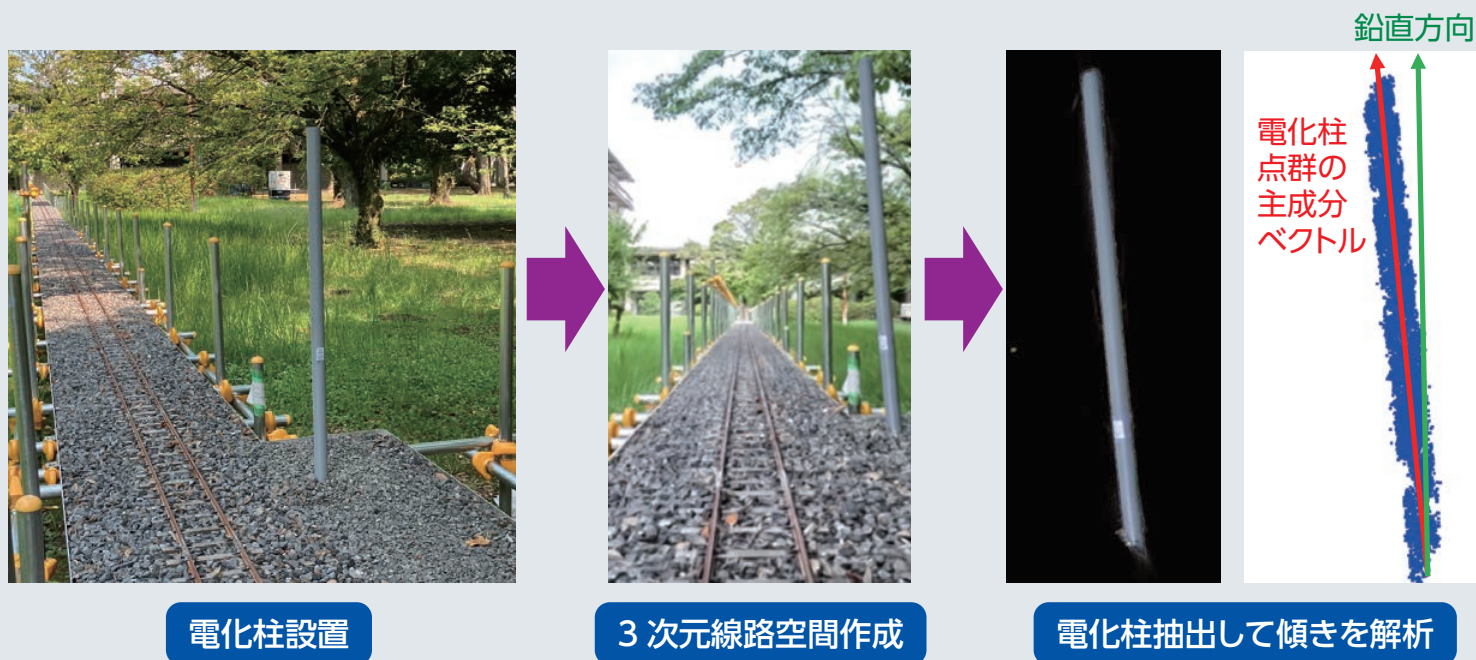


図7 電化柱の設置と3次元構築システムによる活用例

評価試験結果

縮小模型試験線を用いた評価試験では、支障物の種類と環境条件をさまざまに変えながら、検知性能を距離ごとに計測しています。具体的には、昼間・晴天、夜間・晴天、昼間・雨天、夜間・雨天の4つのシナリオを設定し、人物や自動車などの支障物に対する検知率を、対象までの距離の関数として計測する計画です(図6)。検知対象物ごと、環境条件ごとに十分な回数の試験を繰り返すことで、統計的に信頼性の高い性能データを取得でき、さまざまな条件下での検知性能を体系的に整理することが可能になります。

縮小模型試験線は前方監視以外の用途にも活用が可能です。例えば、模型上に設置した電化柱を3次元データとして取得し、柱の傾きを推定する技術の検証を行っています(図7)。電化柱の鉛直方向に対する傾斜を算出するもので、実際の線路では測定環境の制約が大きい条件下でも、模型上であれば安全かつ繰り返し評価が可能です。このように、実線路では再現しづらい

条件を模擬線路で評価できることが大きな利点です。

おわりに

列車前方監視技術の性能評価を目的として構築した縮小模型試験線について紹介しました。相似則を活用することで、カメラ映像上では実際の線路環境と同等の外観を再現できます。さらに、スプリンクラー、フォグマシン、スノーマシンを用いることで降雨・霧・降雪といった悪天候条件も人工的に再現でき、自動走行する車両による繰り返し試験を実現しました。これにより、従来は困難であった条件下での定量的な性能評価が可能となりました。

今後は、さまざまな支障物と環境条件を組み合わせた試験をさらに進め、前方監視技術の性能を幅広い条件下で定量的に整理していく予定です。縮小模型試験線を活用した試験を通じて、列車前方監視技術の信頼性を高め、将来の自動運転における鉄道の安全性向上に貢献していきたいと考えています。RRR