

デジタルツイン構築による冬期道路・交通管理 の効率化の検討

—冬期データの収集・シミュレーションを核としたDXの取組—

国土交通省 北海道開発局 建設部 道路計画課 ○西崎 諒真
浦 建一郎
株式会社ドーコン 交通事業本部交通部 松田 真宣

冬期道路管理においては、大雪や暴風雪の影響による通行止めや大規模滞留が社会的な問題となっており、その解消が重要な課題である。本稿では、デジタル技術の活用による道路の冬期課題解消を目指し、デジタルツイン構築によるデータ集積プラットフォームの開発によるリアルタイムな路面状況・視界状況等のデータ収集及び道路管理の効率化・負担軽減に資する情報提供などについて、検討・取組状況を報告する。

キーワード：冬期道路管理、エッジAI、リアルタイムデータ収集、冬期道路情報提供

1. はじめに

令和6年3月に閣議決定された第9期北海道総合開発計画において、「生産空間を守り安全・安心に住み続けられる強靱な国土づくり」における施策の基本的方向として、「冬期災害時や複合災害に対する防災力の強化」が位置づけられている。また、気候変動などの社会的課題を解決する上で、デジタル技術の積極的な導入によるDXの推進が重要となる。

北海道の冬期は、大雪・視程障害・吹きだまり・路面凍結が頻発し、都市内及び都市間において道路状況の変化が人やモノの移動の妨げになっており、近年においても2022年1～2月の札幌市内における大雪、2023年12月の留萌市の大雪など、全道各地での記録的な大雪により、市民生活と地域経済に大きな影響を与えている。そのため、気象や交通状況の的確な予測、迅速・適切な通行規制・移動制限、除排雪オペレーション等の冬期道路交通マネジメントの構築が急務となっている。

本稿では、地域道路経済戦略研究会 北海道地方研究会の研究テーマ「冬期道路マネジメントのためのデジタルツイン環境の検討」に基づき、デジタル技術の導入、DXの推進による冬期道路管理の課題解消に向けた研究について紹介する。

2. 冬期道路交通マネジメントにおけるデジタルツイン環境の構築

(1) デジタルツイン構築範囲の検討

本研究で検討するデジタルツインによる冬期道路管理

とは、道路空間（フィジカル）の情報を極力大量に取得し、サイバー空間において蓄積・分析するとともに、フィジカル空間へのフィードバックとして、道路管理の効率化に資する情報提供及び道路利用者の行動変容を促す情報提供などを行うことにより、道路行政に貢献するものである。このことから、フィジカル空間とサイバー空間が連携するためのインターフェース（道路API）の構築が本研究のカギとなる。道路APIが有するべき基本機能として、以下を設定した（図-1）。

a) フィジカル空間からサイバー空間への連携：

車載システムやCCTV、気象関係のシステムなど道路を含むフィジカル空間で観測された多様なデータを、低容量なデータ通信でサイバー空間に到達させることが可能な機構

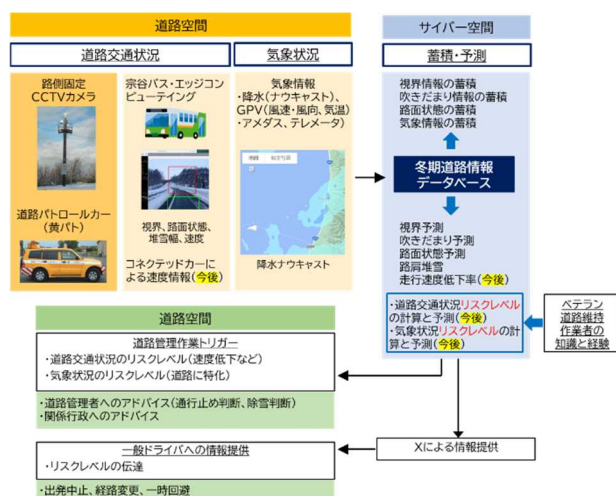


図-1 郊外路線におけるデジタルツインの構成と役割(例)

b) 常時観測のデータと取得データに基づく予測手法の連携：

フィジカル空間で収集されたデータを動的に構造化する形でデータ蓄積するサーバシステムから、予測に必要なデータを予測手法が要求する形式で提供し、その出力結果を構造化して格納する機構

c) デジタルツインに集積・計算された各種データとフィジカル空間の連携：

フィジカル空間でデジタルツインの出力を待つ道路管理者、道路維持事業者及び都市間バスを運行するバス会社等、ヒトに対する情報提供を可能にするリアルタイムな可視化インタフェース

本研究におけるデジタルツイン構築範囲は、令和3年度に大雪を記録した札幌市から、道内でも特に吹雪の発生頻度が高い留萌地方、宗谷地方を經由し、稚内市までの国道とした。

また、道路情報の収集については、CCTVカメラや気象情報などの基本情報のほか、バス会社にご協力いただき、車載カメラとエッジAI技術による路面状況、視界状況のリアルタイムモニタリングを行っている。これらの情報をサイバー空間で分析し、フィジカル空間へフィードバックする情報提供の実証実験を行うシステムの構築を行っている。

(2) エッジAI技術を活用したリアルタイムで低容量なデータセンシング

a) 車載システムによるモニタリング手法の検討

積雪寒冷地では、暴風雪や吹き溜まり等による視界不良が一日を通して発生する。吹雪時の視界不良は、交通事故のリスクだけでなく、車両滞留や通行止めのリスクも高まる。

そこで、一日を通して広範かつ連続的に視界状況等を把握可能とするため、前照灯によって道路空間が視認できる車両の車載カメラによって取得された前方視野映像の活用を検討した。具体的には、冬期的前方視野映像にみられる降雪・地吹雪時の複雑な特徴を複数の画像特徴量で表現し、それらの特徴量に基づく識別器をLate-fusionする機構を備えたEdge-computingシステムによる夜間の視界レベル推定手法について検討する。Edge-computingとはデータ生成源の近傍でデータ解析を行い、冗長なデータを除外することで、近年増加するデータの転送量を削減する仕組みである。車両による観測は、単一車両であれば局所的な観測となるが、その走行台数やタイミングによって、連続的かつリアルタイムなモニタリングが期待できる。

Edge-computingシステムを駆動させ、その演算時間から実現可能性を確認したところ、表-1より、23.80秒で全

表-1 計算項目毎の演算時間と総演算時間

項目			演算時間[sec]
特徴量算出		空間周波数	9.56
		明度	4.18
		Optical Flow	3.61
		Inception-v3	3.31
		車速	4.15×10 ⁻⁵
識別結果の算出	SVM	空間周波数	6.85×10⁻¹
		明度	1.12×10 ⁻¹
		Optical Flow	1.69×10 ⁻²
		Inception-v3	7.47×10 ⁻¹
		車速	2.30×10 ⁻²
	ELM	空間周波数	8.30×10 ⁻²
		明度	1.07×10 ⁻¹
		Optical Flow	9.60×10⁻⁴
		Inception-v3	1.05
		車速	6.82×10⁻⁴
入力映像→推定結果（総演算時間）			23.80

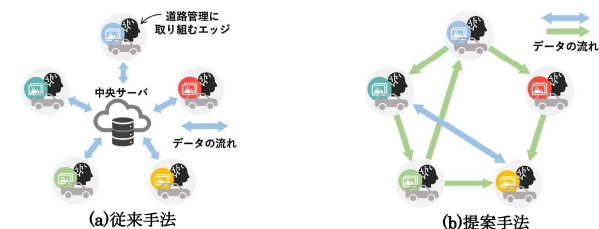


図-2 本検討の概要

演算が完了することを確認した。これより、車速を40km/h未満とした場合、250m程度に1度解析可能であり、空間的に連続した視界状況把握が実現可能であることを確認した。

b) 車載システムに搭載するAIの自立学習手法の構築

本検討では、エッジAIの再学習にかかる通信量と計算量を削減し軽量化することを目的としている。本検討の概要を図-2に示す。具体的には、まず他のエッジから、自身が保持するデータとは性質が異なるデータのみを獲得する。次に、再学習にかかる計算量を抑えた方法によって、獲得したデータを用いてエッジAIを再学習する。これにより、再学習にかかる通信コストと計算コストを抑えられることが期待される。加えて、性質が異なるデータのみを学習することによって、再学習に用いるデータが少量であっても、汎化性能に優れたエッジAIの再学習が期待できる。本研究では、自身が保持するデータとは性質が異なるデータの獲得方法とその活用方法を確立し、実空間モニタリングを行うエッジAIの再学習に貢献することを目指す。

この目的を達成するためには、「(1)エッジが元々持つデータとは性質が異なるデータを保持するエッジの選択方法」「(2)選択したエッジから獲得したデータを活用するための計算量を抑えた再学習法」の2つの技術を構築する必要がある。

上述した技術を構築するために、本研究では、エッジ同士の違いを測る指標として類似度を定義し、類似度が最小となるエッジを再学習のために選択してデータを獲得し、選択したエッジとのデータのやり取りを1回で完了し、かつ計算量を抑えた再学習方法を検討する。本研究で構築する技術の概要を図-3に示す。

2つの技術のうち、「(2) 選択したエッジから獲得したデータを活用するための計算量を抑えた再学習法」は、ニューラルネットワークからなる機械学習モデルの重み行列を置き換えて、出力結果の正誤に応じて重み行列の値を補正する逆誤差伝搬法を用いて重み行列を補正する手法である(図-4)。

提案手法の有効性の確認のため、車載カメラから得られた画像を用いて道路の路面状態を乾燥(dry)、半潤(semi wet)、湿潤(wet)、シャーベット(slush)、凍結(ice)、新雪(fresh)の6つに分類する機械学習モデルを2つ構築し、次に、再学習する機械学習モデルを一つ定め、他方の機械学習モデルの重み行列のみを用いて再学習し、性能評価を行った。

路面状態の推定に用いるデータセットには、一般道(札幌市街地) および高規格道路(道央道と深川留萌自動車道)の3地域で撮影された画像を、先述の6つの路面状態に分類し使用した(図-5)。

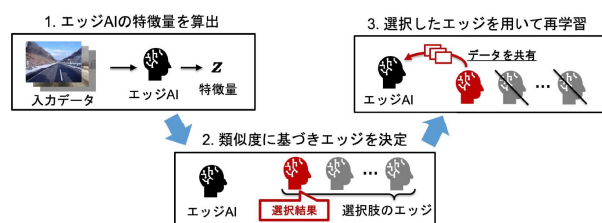


図-3 提案手法の概要図

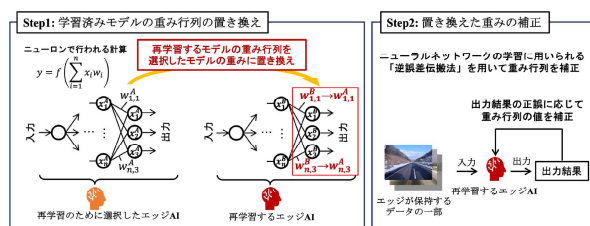


図-4 計算コストを抑えた再学習法の概要



図-5 6種類の路面状態

また、複数のエッジ AI を比較することにより、上述の2つの技術構築について検証し、性質が異なるデータを獲得し再学習を行うことで、使用したデータセットではない未知のデータを使用した場合の判別性能の向上に貢献することを確認した。

c) 車載機システム構築による連続的かつリアルタイムなデータ収集

デジタル技術の活用による道路管理の効率化等を実現するためには、デジタルツイン環境の構築に加え、道路空間における現況の情報収集が重要となる。このデータ収集を実現するため、地域のバス会社に協力をいただき、都市間高速バスに車載機システムを搭載した(図-6)。

路線は札幌-稚内間及び札幌-枝幸間の2路線で15台のバスで試行している。これにより、道路空間の路面、視界情報を連続的かつリアルタイムに、更には長期的に収集できる体制を構築した。車載機システムは、収集したデータをエッジAIによりリアルタイムに画像解析し、路面状況、視界状況を分類した上で位置情報を表示可能なデジタルツイン環境の一部となる(図-7)。



図-6 都市間高速バスに搭載した車載機システム

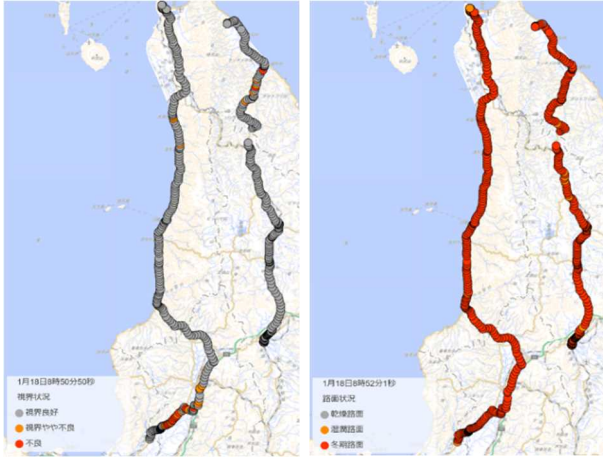


図-7 収集したデータの位置情報をリアルタイムで表示

走行中の車両からの画像およびWIPS値の集積：データ集積基盤の構成器材等

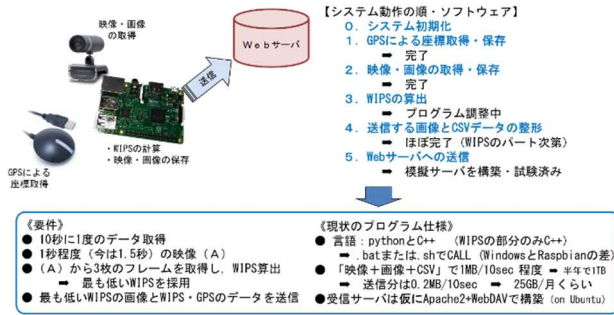


図-8 解析結果のデータを受け入れるサーバのプロトタイプ仕様

(3) 冬期道路管理・交通マネジメントを可能とするデータ収集プラットフォームの開発

デジタルツインによる冬期道路管理・交通マネジメントを図るため、道路空間から複数のエッジにより大量に収集・解析したデータをサイバー空間に集積し、更にフィジカル空間へフィードバック（道路管理者、一般道路利用者への情報提供）する基幹システムの構築を行う。前述の3つの道路APIを実装し、デジタルツインの基本機能を実際に稼働させることを目指すものである。具体的には、一般的なWebDAVシステムによってデータを受信する仕組みを構築した。そのプロトタイプ仕様を図-8に示す。この一般的な仕組みにおいて、不定期に起動およびデータ送信する15台のエッジから、データをもれなく収受できることを確認した。

(4) 路面状況・視界予測の検討

冬期道路管理の効率化及び交通マネジメントを図るため、気象情報の適切な予測の検討も重要となる。デジタルツインでの道路の路面や視界の先読み情報予測のため、過去の路面データと気象データに基づく空間方向の系列データを用いて、積雪寒冷地における路面状態を予測する手法のプロトタイプを検討した。

蓄積された道路データと気象データを用いて空間方向

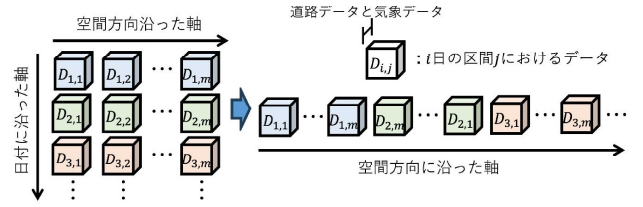


図-9 空間方向の系列データ構築

の系列データを構築する。次に、構築した系列データを用いて路面状態を予測するモデルを構築し、未観測の路面状態を予測する。提案手法により得られる予測結果を活用することで、従来の道路管理から拡張し、道路環境を先読みした新たな取り組みが可能となると考えられる。

提案手法では、道路データと気象データから系列データを構築する。図-9に系列データ構築の概要を示す。

ある道路における道路データは、連続した n 日から構成され、1日あたり m 個の区間に分割されているとする。また、 i 日 ($1 \leq i \leq n$) のある区間 j ($1 \leq j \leq m$) に対して、1つの路面状態 $\ell_{i,j}^0$ が対応しており、この路面状態には、 $i-1$ 日の区間 j における路面状態 $\ell_{i-1,j}^0$ と、 $i-1$ 日と i 日の区間 j における k 個の気象データ $w = (w_1, w_2, \dots, w_k)$ が紐づいているとする。

このとき、データセット $\mathbf{D}$ は、 i 日における区間 j の道路データ及び気象データを $(k+2)$ 次元の $\vec{D}_{i,j} = (w_1, \dots, w_k, \ell_{i,j-1}^0, \ell_{i,j}^0)$ として、(1)式のように $n \times m \times (k+2)$ の行列で表される。

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \vec{D}_{1,1} & \dots & \vec{D}_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vec{D}_{n,1} & \dots & \vec{D}_{n,m} \end{pmatrix} \quad (1)$$

このデータセット $\mathbf{D}$ を、空間方向の系列データセット $\mathbf{S}$ に変換する。変換後のデータセット $\mathbf{S}$ は空間方向に沿って構築され、(2)式のように $(n \times m) \times (k+2)$ の行列で表される。

$$\mathbf{S} = (\vec{D}_{1,1}, \vec{D}_{1,2}, \dots, \vec{D}_{1,m}, \vec{D}_{2,m}, \vec{D}_{2,m-1}, \dots, \vec{D}_{2,1}, \vec{D}_{3,1}, \dots) \quad (2)$$

構築したプロトタイプモデルについて、性能確認を行う。本実験では、 i 日の道路データと、 i 日と $i+1$ 日の気象データを入力として、 $i+1$ 日の路面状態を予測する。学習に用いる350日分のデータセットのうち、230日分を学習データセットに、120日分をテストデータセットとした。また、比較手法としては次の3つを用いる。

a) 時間軸方向で最頻値を用いた手法(比較手法1)

比較手法1では、時間軸方向の最頻値の計算を行うことにより路面予測を行う。提案手法と比較手法1を比較することによって、空間方向の系列データを構築することの有効性を確認する。

b) 道路データのみを用いた手法(比較手法2)

比較手法2では、道路データのみを予測モデルの入力

として路面予測を行う。提案手法と比較手法2を比較することによって、路面予測の説明変数に気象データを用いることの有効性を確認する。

c) 予測結果を補正しない手法(比較手法3)

比較手法3では、最頻値による予測結果の補正を行わずに路面予測を行う。提案手法と比較手法3を比較することによって、予測結果の補正に最頻値を導入することの有効性を確認した。

実験結果を図-10および表-2に示す。図-10から、予測対象とする120日の正解率は0.784と高い結果が得られた。また、夏の期間(5月～10月)において、降水に伴い道路状態が変化する日に対しても、路面の状態変化がdryからwetに変化することを予測できている。このことから、提案手法を用いることで気象データを反映させた路面状態の予測が期待できる。

なお、夏と冬以外の期間(季節の変わり目)においては、誤った予測が非常に多くなることから、季節の変わり目に対する予測精度の向上は今後の課題となる。

提案手法と比較手法1、比較手法2に着目する。表-2から、いずれの季節においても正解率の大きな差は見られないが、夏の期間における適合率、再現率、F値には大きな差が見られる。これは、夏の期間の多くのデータがdryとなる構成になっているため、2つの比較手法では夏の期間の全てをdryと予測しており、正解率が高いが適合率、再現率、F値は低い予測手法となる。一方で、提案手法においては、適合率、再現率、F値いずれも0.85以上と高い値となる。加えて、夏以外の期間でも、全ての評価指標において提案手法の方が同じ値または高い値となることが確認できる。以上のことから、空間方向の系列データを用いた予測を行うことと、路面状態の予測に気象データを導入することの有効性が確認できる。

提案手法と比較手法3に着目する。表-2から、冬の期

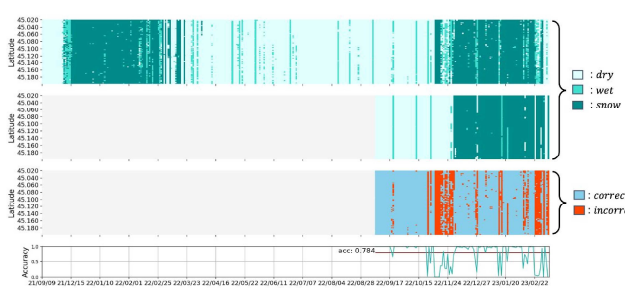


図-10 提案手法を用いた予測結果

表-2 提案手法と3つの比較手法でそれぞれ路面を状態予測した結果に基づく評価指標

	提案手法			比較手法1			比較手法2			比較手法3		
	夏期	冬期	他	夏期	冬期	他	夏期	冬期	他	夏期	冬期	他
正解率	0.97	0.83	0.65	0.93	0.82	0.59	0.93	0.85	0.67	0.97	0.80	0.65
再現率	0.92	0.44	0.62	0.47	0.31	0.34	0.47	0.33	0.46	0.92	0.38	0.63
適合率	0.85	0.39	0.43	0.50	0.31	0.34	0.50	0.43	0.45	0.85	0.37	0.45
F 値	0.88	0.40	0.42	0.48	0.31	0.31	0.48	0.35	0.43	0.88	0.36	0.45

間においては、全ての評価指標に関して提案手法の方が比較手法3に比してわずかに高い値となることが確認できる。一方で、夏と冬以外の期間(季節の変わり目)は、比較手法3の方が提案手法に比してわずかに高い値となることが確認できる。最頻値による補正の適用前後で予測結果が変わった区間数は、予測する区間総数の10,800個のうち315個であった。このことから、提案手法に含まれる予測結果の補正により、全体の約3%の補正が可能であり、冬の期間への予測精度向上に貢献する可能性が示唆された。しかし、夏と冬以外の期間(季節の変わり目)においては予測精度を劣化させてしまうため、季節に依存しない頑健な予測結果の補正手法の検討が必要である。

「デジタルツインにおける路面と視界の先読み情報」を提供可能な仕組みの構築に向けては、予測アルゴリズムの高度化、さらには気象レーダやCCTVから得るデータなどとの連携も引き続き検討が必要である。

(5) 道路管理の効率化・負担軽減に資する情報提供

冬期道路維持管理作業における有用性の高い情報の検討に際し、デジタルツイン環境を構築したエリアである、留萌地方と宗谷地方で道路管理に関する業務従事者(国道の維持事業者)へのヒアリングを実施した。

両地方でのヒアリング調査結果より、画像などで道路の視界や路面の状態を確認できるようにすることや、降雪や地吹雪による視界不良などを把握するために風速・風向などの情報を含む気象データが閲覧できるようになるデジタルツインへの期待が大きいことが確認された。

また、冬期道路管理においては、実際の道路空間における道路交通状況と気象状況の2つの情報が必要であることが確認できた。このことから、デジタルツインを構築した路線内での収集したデータに基づく、視界状況と路面状態及びそれらに關係する気象データとして気象レーダの観測データと風向・風速、降雪量を情報提供するプロトタイプシステムとしてのポータル機能(1次情報提供)をSNSであるX(旧Twitter)に実装した実証実験を行った。

更に視界状況、路面状態について、Webシステムによる情報提供を行うべく、プラットフォーム上でのシステム構築を行い、国道維持事業者への情報提供や地域FMから一般道路利用者への情報提供を行う実証実験を行った。

実証実験結果については、試行の取り組みの協力者へのヒアリング等を通じ、その効果と課題を整理する予定である。

3. まとめ

本稿では、デジタルツインの構築により、冬期道路管理の課題解消を目指す、冬期道路交通マネジメントの研

究の取り組みを紹介した。なお、本研究は地域道路経済戦略研究会北海道地方研究会の研究テーマとなっている。本研究により、デジタルツイン環境を構築することで、道路空間（フィジカル空間）とサイバー空間を連携するシステムを構築し、画像解析による視界状況、路面状態等の情報収集、蓄積、道路管理者及び一般道路利用者への情報提供（フィジカル空間へのフィードバック）まで、一連の実証実験を行い、その有効性を確認した。また、本検討は冬期事象のみならず、濃霧、大雨による法面崩壊、冠水等への早期対応にも寄与する可能性が期待できる。

今後もこれらDX技術の研究・取り組みを推進し、より安全で快適な道路管理の実現を目指し研鑽を継続したいと考えている。

謝辞：本稿は、地域道路経済戦略研究会北海道地方研究会の委員である北海道大学高橋翔准教授が取り組む研究テーマから研究成果を紹介させていただいた。ここに感謝の意を表します。