



Title	冬期路面モニタリングのための車載センサを用いた機械学習に関する研究
Author(s)	石附, 将武
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16849号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16849
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99694
Type	doctoral thesis
File Information	Masamu_Ishizuki_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 石附 将武

学 位 論 文 題 名

冬期路面モニタリングのための車載センサを用いた機械学習に関する研究

(A Study on Machine Learning based on In-vehicle Sensor for Winter Road Surface Monitoring)

積雪寒冷地域において、冬期の道路交通は、積雪や凍結に起因するスリップ事故が多発し、安全上の課題となっている。このような積雪や凍結、湿潤といった路面の変化を路面状態と呼び、広範囲の路面状態をリアルタイムかつ正確に把握する技術が、上記のような交通事故の低減をはじめ、除雪・融雪などの道路管理の効率化、さらには先進運転支援システム (ADAS) や自動運転技術の高度化のため求められる。

この要求に対し、道路に固定されたセンサーだけでなく、車両自体にセンサーを搭載し、走行しながら路面状態を判別するアプローチが研究されている。特に、ドライブレコーダーや車載カメラは既に多くの車両に搭載されており、これらを活用した画像ベースの路面状態判別技術は、低コストで広域の情報を収集する上で実用性が高いと考えられる。

しかし、車載センサーを用いた路面状態判別には複数の技術的課題が存在する。第一に、単一のセンサーでは全ての走行状況や環境に対応しきれない課題がある。例えば、画像だけでは天候や光（逆光、ヘッドライト）の影響を受けやすく、また濡れ (Wet) と凍結 (Icy) といった光学的に近い路面状態の判別が困難な場合がある。一方で、タイヤ内加速度センサーやマイクを使ってタイヤと路面の接触情報を利用する方法は、路面状態を直接的に捉えることが可能であり、北海道の高速道路における凍結防止剤自動散布システムで活用されるなど、高精度な判別技術として実用化されている。しかし、このようなセンサーはコストが高く、また一般道のような低速走行環境では判別性能が低下するという課題がある。第二に、ADAS や自動ブレーキ等の車両制御では瞬時的な判断が求められるため、路面状態の判別処理は遅延が発生するネットワーク越しのサーバーではなく、車載機器で高速に実行されねばならない。近年、画像を使った路面状態判別は深層学習を用いた方法が主流であるが、一般に深層学習は計算量が多いため、これを軽量化して高速化することが求められる。第三に、データから学習した判別器は、学習したデータ（例：高速道路）と異なる環境（例：一般道）では性能が低下する「ドメインシフト」の問題がある一方、多様な道路環境すべてに対応する学習データを収集・アノテーションすることは、コスト面で現実的でない。

そこで、本研究では、カメラで撮影した画像を中心とした車載センサーを用いて、多様な道路環境において高精度かつ高速に動作する実用的な冬期路面状態推定システムの構築を目的とし、上記の課題を克服するため、以下の3つの側面からアプローチを行った。第一に、単一センサーの弱点を補完するため、情報源の異なる複数の車載センサー（カメラとタイヤ内の加速度センサー）を効果的に統合する「マルチモーダル判別モデル」を提案する。第二に、高精度な深層学習モデルを車載器の限られたリソースで高速動作させるため、網羅的な枝刈りを行うことで路面状態判別に特化した深層学習モデルの作成を行う。第三に、学習環境と実環境の差異（ドメインシフト）による性能低下を低コストで抑制するため、モデルを再学習することなく判別結果を補正する手法を提案する。これら3つの研究成果を統合することで、実用的かつ高精度な路面状態推定システムの基盤技術を確立する。

本論文は全 6 章から構成されており、各章の要旨を以下に述べる。

1 章では、本研究の背景・目的を述べる。積雪寒冷地における交通安全や道路管理の課題を示し、車載センサーによる冬期路面状態推定の重要性と、既存技術の課題を説明する。そして、これらを解決するための本研究のアプローチと、本論文全体の構成について記述する。

2 章では、本研究に関連する先行研究を整理する。路面状態推定技術について、固定式センサーと車載センサー（タイヤ内センサー、音響センサー、光学センサー、車載カメラ等）を用いた手法を説明する。また、複数のセンサー情報を統合するマルチモーダル機械学習、深層学習モデルの軽量化、およびドメイン適応に関する技術動向を調査し、本研究の新規性と位置づけを明確にする。

3 章では、第一の課題である単一センサーの限界に対し、画像とタイヤ内加速度センサーなどの路面接触系センサーという、特性の異なる複数の情報を統合する判別モデルを提案する。本章では、各センサーから個別に路面状態の確率を推定し、それらの確率を最後に統合する Late Fusion 判別器を設計した。実車を用いた走行実験により、カメラ単体や接触系センサー単体で判別する場合と比較し、提案する判別器が、特に判別が困難とされる半湿、湿潤、凍結路面において判別精度を改善し、システム全体の頑健性を向上させることを確認した。

4 章では、第二の課題である処理時間に対応するため、車載器でのリアルタイム処理を目的とした、カメラ画像に基づく深層学習モデルの軽量化・最適化手法について述べる。本章では、汎用の軽量の畳み込みニューラルネットワーク (CNN) 判別器である MobileNetV3-Small をベースラインとし、そのアーキテクチャを構成するブロックを体系的に枝刈りすることで、路面状態判別に特化した最適なアーキテクチャを網羅的に探索した。その結果、ブロック数を 11 ブロックから 2 ブロックまで削減したタスク特化型判別器が、ベースラインの判別器に対し判別時間を約 50% 削減しつつ、判別精度 (F1 スコア) を約 7% 向上させる結果を得た。またベースラインの判別器が路面状態判別タスクに対して複雑であり、過学習の傾向があることを発見した。

5 章では、第三の課題であるドメインシフトに対し、高速道路のデータで学習した深層学習モデルを、環境の異なる一般道へ低コストで適応させる手法を提案する。一般道用のデータをアノテーション・再学習することを避け、既存の学習済みモデルを活用することを前提とする。提案手法は、(1) モデルの出力する確信度が低い場合のみを訂正対象とし、(2) 判別器の中間層から得られる特徴ベクトル空間において、k 近傍法を用いて、事前に収集したラベルなしの一般道データ群 (参照データ) の近傍情報を参照する。この「k 近傍ラベル訂正」により、一般道での判別精度を向上させ、特に危険側の路面 (積雪、凍結) を安全側 (乾燥) と誤判別する危険な誤判別を削減できることを示した。

6 章では、本論文で得られた成果を総括する。車載センサーによる冬期路面状態推定の実用化に向け、(1) マルチモーダル統合、(2) タスク特化型軽量化、(3) 低コストドメイン適応、という 3 つの側面から提案した手法の有効性をまとめる。また、本研究の成果が交通安全や道路管理の効率化に与える貢献について述べるとともに、残された課題 (さらなる多様な環境への対応、悪天候時の頑健性など) と今後の展望について論じる。