路面画像と深層学習を用いた積雪時の路面凹凸高さ推定手法

齊田　光[1]・大廣　智則[2]・奥村　航太[3]・伊東　靖彦[4]・高野　伸栄[5]

[1]正会員　国立研究開発法人土木研究所　寒地土木研究所（〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34）

E-mail: saida-a@ceri.go.jp (Corresponding Author)

[2]正会員　国立研究開発法人土木研究所　寒地土木研究所（〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34）

E-mail: oohiro-t@ceri.go.jp

[3]正会員　国立研究開発法人土木研究所　寒地土木研究所（〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34）

E-mail: okumura-k@ceri.go.jp

[4]正会員　国立研究開発法人土木研究所　寒地土木研究所（〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34）

E-mail: yasu-ito@ceri.go.jp

[5]正会員　北海道大学大学院　工学研究院（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）

E-mail: shey@eng.hokudai.ac.jp

積雪により生じる路面の凹凸は車両のスタック，走行速度低下や歩行者の転倒事故の原因となる．このような積雪時の路面凹凸に起因する交通への影響を小さくするためには，積雪時の路面凹凸高さを定量的に把握することが重要である．しかしながら，積雪時の路面凹凸高さを定量的，安価かつ簡単に把握する手法は確立されていない．

本研究では，LIDAR センサを用いて路面の 3 次元形状と路面画像を収集し，深層学習モデルに必要な学習用データを生成する手法を開発した．また，先述の手法で生成した学習用データを用いて，路面を撮影した画像から深層学習により積雪時の路面凹凸高さを推定する手法を開発した．本研究で開発した積雪時の路面凹凸高さ推定手法を用いることで，積雪時の路面凹凸高さを 3cm 未満の誤差で推定できることを確認した．

Key Words: *Winter road maintenance, Snow bump height, Deep leaning, Convolutional neural network*

1. はじめに

(1) 研究の背景

冬期の道路において，積雪により生じる路面の凹凸は安全・快適な道路交通を維持する上で妨げとなる．積雪により生じた路面の凹凸は大規模な車両滞留の引き金となる車両スタックの原因となることが示されており，積雪寒冷地域では車両スタックによる大規模な渋滞や道路通行止めが度々発生している [1]．また，冬期道路では積雪による路面凹凸の発生は通行車両の平均旅行速度の低下を引き起こすことが明らかとなっている [2]．

さらに，積雪により生じる路面の凹凸は自動車交通への悪影響のみならず歩行者の転倒を引き起こす可能性が示されている．徳永らは人工的に作成した様々な性状の雪氷路面において歩行速度や歩行異常（立ち止まりや転倒など）の発生回数を計測するとともに歩きやすさなどに関するアンケート調査を行い，主観的・客観的指標のいずれにおいても積雪による路面凹凸の解消が安全な歩行に大きく寄与することを明らかにしている [3]．

このように，積雪による路面凹凸の発生は交通障害やサービスレベルの低下につながるため，道路管理者は適宜路面整正作業などを行うことで積雪時の路面凹凸の解消に努めている．しかしながら冬期道路管理作業に関する予算には限りがあるため，道路管理者は積雪時の路面

凹凸の状態を把握し，路面整正作業等を行う区間やタイミングを適正化することが求められている．また，近年になり藤本らは積雪路面における車両スタックの発生メカニズムを明らかにした [4]．当該研究の結果は，路面すべり摩擦係数に加えて積雪による路面凹凸高さを計測することが出来れば車両スタックの発生可能性を評価できる可能性があることを示している．このような背景から，積雪により生じる路面凹凸の高さを把握するための技術は冬期において安全・快適な道路交通を維持する上で重要になっていくと考えられる．

(2) 積雪時の路面凹凸の把握手法

積雪による路面凹凸の発生状況は，道路パトロール車両からの目視などにより把握されている．この手法は定性的な積雪による路面凹凸の状況を容易に把握できる一方で，積雪による路面凹凸の高さを定量的に把握することは困難である．積雪による路面凹凸の発生状況を把握する手法としては，車両に搭載した LIDAR センサを用いて路面積雪の 3 次元形状を計測する方法が提案されている [5]．当該手法は車両走行経路上の積雪による路面凹凸の有無を把握することが可能である一方で，車両上から路面積雪の3次元形状を計測可能なLIDARセンサは非常に高額である．近年では LIDAR センサを搭載した携帯情報端末が発売されており，このような機器は安価であることから小規模な土木工事における出来形管理などへの活用が検討されている [6]．携帯情報端末に搭載されたLIDARセンサを用いると安価に路面積雪の3次元形状を計測できる可能性があるが，携帯情報端末に搭載される LIDAR センサはレーザーの到達距離や走査速度が限られており，高速で走行する車両上から物体の 3 次元形状を計測することは不得手としている．このように，従来の道路パトロール車両からの目視による 路面凹凸発生状況の把握を代替する技術としては，LIDAR センサを用いた手法は費用や実用性の点で課題を有している．

近年になり，中村らは深層学習を利用して画像に映っている積雪路面の凹凸高さを数段階に分類する手法を提案した [7]．当該手法は車載カメラにより撮影した路面画像から積雪により生じた路面凹凸高さを推定することが可能であり，低コストかつ走行車両上からの積雪による路面凹凸高さ把握を可能としている．一方で，当該手法は積雪による路面凹凸高さを推定する深層学習モデルの学習用データとして目視による積雪時の路面凹凸高さを用いているため，推定精度には改良の余地があると考えられる．

(3) 研究の目的

本研究では，冬期の交通障害の要因となる積雪時の路面凹凸の高さを安価，簡単かつ定量的に推定する手法を提案することを目的とする．この目的を達成するために，LIDAR センサにより収集した路面凹凸実測データを用いて積雪時の路面凹凸高さを推定する深層学習モデルを作成し，画像から積雪時の路面凹凸高さを推定する手法を提案する．併せて，積雪時の路面凹凸高さを推定する深層学習モデルの訓練に必要な学習用データの生成手法を提案する．

2. 深層学習を用いた積雪時の路面凹凸高さ推定手法

本研究では，畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network，以下 CNN）を用いることで画像から積雪時の路面凹凸高さを推定する手法を開発した．本研究で開発した手法では，カメラで撮影した画像のうち積雪による路面凹凸高さを推定したい領域を切り出し，切り出した画像を学習済み CNN に入力することで積雪時の路面凹凸高さを定量的に推定する．

上記の学習済み CNN を作成するためには，CNN の学習を行うためのデータ（学習用データ）を多数用意し，CNN の学習を行う必要がある．以下に本手法で用いた学習用データおよびCNNの詳細を示す．

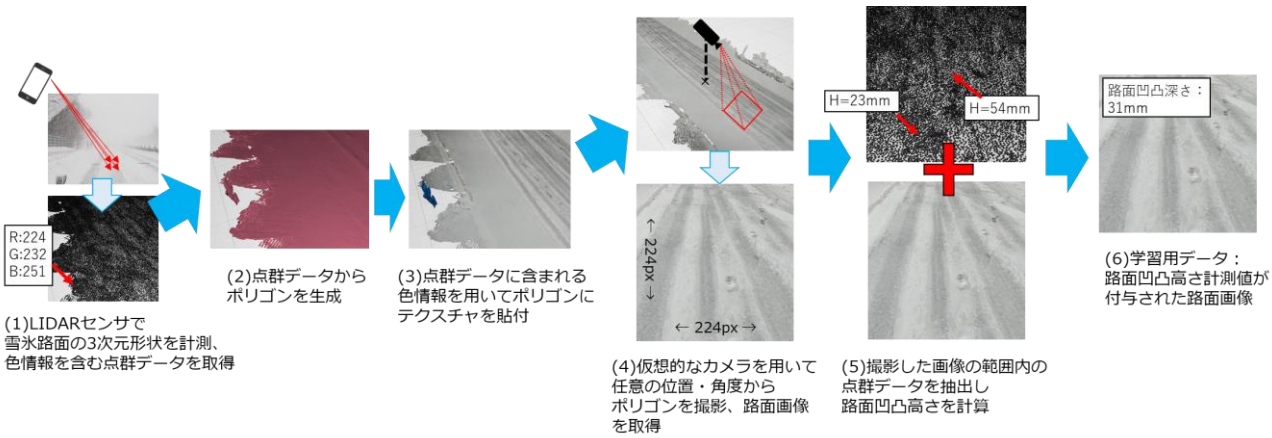


図-1 CNN の学習用データ生成方法の概要

(1) 深層学習モデルの訓練に用いたデータの生成方法

図-1 は CNN の学習用データの生成手法を示す．本手法では，携帯端末機器（Apple iPad Pro 2021 および iPhone 14 Pro）に搭載されている LIDAR センサを用いて収集された路面凹凸高さ計測値および路面画像を用いて学習用データを生成する．上記の LIDAR センサは 3～4m 程度までの距離にある物体の形状および色情報を 3 次元点群データとして得ることが可能である．本研究では LIDAR センサを搭載した携帯端末機器を手に持ち，2km/h 程度の速度で携帯端末を左右に振りながら移動することで幅 3m 程度，長さ 20～30m 程度の路面の 3 次元点群データを取得した（図-1(1)）．その後，3 次元点群データの各点を頂点とするポリゴンを生成し（図-1(2)），点群に付随する色情報データを用いてポリゴンにテクスチャを付与することで路面凹凸高さの 3 次元ポリゴンデータを得た（図-1(3)）．なお，3 次元点群データの収集，3 次元点群データを基にした路面凹凸高さ形状データ生成には 3D Scanner App を用いた．

その後，得られた路面凹凸高さの 3 次元ポリゴンデータを Open3D[8]を用いて描画し，描画された路面画像から一定範囲の領域を切り出すことで幅および高さ 224px の路面画像を得た．路面画像の切り出しは，図-1(4)に示すように Open3D 上で描画した路面凹凸高さの 3 次元ポリゴンデータの近傍に仮想的なカメラを設置し，仮想的なカメラに映っている領域を抽出することで行った．本手法では仮想的なカメラの設置高さなどを調整することで車載カメラのような低い位置から撮影した路面画像や道路 CCTV カメラのような高い位置に設置されたカメラから撮影した路面画像などを得ることが可能である．本論文では車載カメラから得られた路面画像を基に積雪時の路面凹凸高さを推定する CNN を作成することを目的として，仮想的なカメラを路面から約 1m の高さに俯角 30 度で設置し路面画像の切り出しを行った．また，仮想的なカメラ位置を水平方向に 0.2m ずつ移動し，カメラの撮影方向を 0～360 度の間で 45 度ずつ回転させることで，路面凹凸高さの 3 次元ポリゴンデータの各位置において各方向から撮影した路面画像を得た．同時に，路面画像に映っている領域に含まれる 3 次元点群データの高さ情報を抽出し，抽出した点群データ高さの 90 パーセンタイル値と 10 パーセンタイル値の差を路面画像中の路面凹凸高さとした（図-1(5)）．以上の方法で得られた路面画像と路面凹凸高さを紐づけし，正解ラベルとして路面凹凸高さを有する路面画像データを学習用データとして生成した（図-1(6)）．

(2) 積雪による路面凹凸高さの推定方法

本研究では冬期道路管理の現場で安価，定量的かつ精度良く積雪による路面凹凸高さを把握する手法を開発することを目的としている．このため，本研究では積雪による路面凹凸高さを推定する CNN の構造として，高速かつ高精度な推論が可能な EfficientNetV2 [9]を用いた．なお，前述の参考文献中で示されている EfficientNetV2 は入力されたデータの分類を行うための構造となっている．本研究では EfficientNetV2 の構造の末尾に出力サイズ 1 の全結合層を追加することで，入力された画像を基に積雪による路面凹凸高さの値を出力する CNN を構築した．

3. 積雪による路面凹凸高さの推定精度検証

(1) 検証方法

本研究では，前章に示す方法で生成した CNN を用いて，積雪による路面凹凸高さの推定精度を検証した．積雪による路面凹凸高さの推定を行う CNN は，学習用データとして北海道札幌市および苫小牧市で 2022 年度冬期の日中に収集した LIDAR 計測データを用いて訓練を行った．学習用データには，正解ラベルとして付与された路面凹凸高さが 0mm 以上 30mm 未満，30mm 以上 60mm 未満，…，120mm 以上 150mm 未満を満たす路面画像データを各 32 万個，合計 160 万個のデータを使用した．なお，路面凹凸高さが 120mm 以上 150mm 未満である学習用データは基となる路面凹凸高さ実測値および路面画像データの数が約 18 万個であったため，路面画像を左右反転させる（Data augmentation を行う）ことで学習用データ数を 32 万個まで増やした．

生成した CNN による路面凹凸高さ推定精度の検証には，学習用データとは異なる日時および場所で得られた LIDAR 計測データから作成された精度検証用データを用いた．精度検証用データには，学習用データと同様にデータ中の路面凹凸高さが 0mm 以上 30mm 未満，30mm 以上 60mm 未満，…，120mm 以上 150mm 未満を満たすデータを各 500 個，合計 2500 個のデータを使用した．なお，CNN の学習および精度検証は Python 3.8.12 および Tensorflow2.8.0 で実装したソフトウェアにより行った．

(2) 検証結果および考察

図-2 は積雪による路面凹凸高さの実測値 D_{obs} と本研究で提案する手法により推定した積雪による路面凹凸高さの推定値 D_{est} の関係を示す．D_{est} の推定精度は二乗平方平均誤差で 28mm，D_{est} の絶対推定誤差が 30mm 未満であった場合を的中とした時の的中率は 72%，および D_{est} と D_{est} 間の決定係数は 0.575 であり，本研究で提案した手法を用いると積雪による路面凹凸高さを定量的に推定できる可能性があることが明らかとなった．一方で，D_{obs} が概ね 60mm 以下である条件下では，D_{est} は D_{obs} より大きくなった（図-2(a)）．この原因としては，D_{obs} が 60mm 未満となる条件下の学習用および精度検証用データには路面

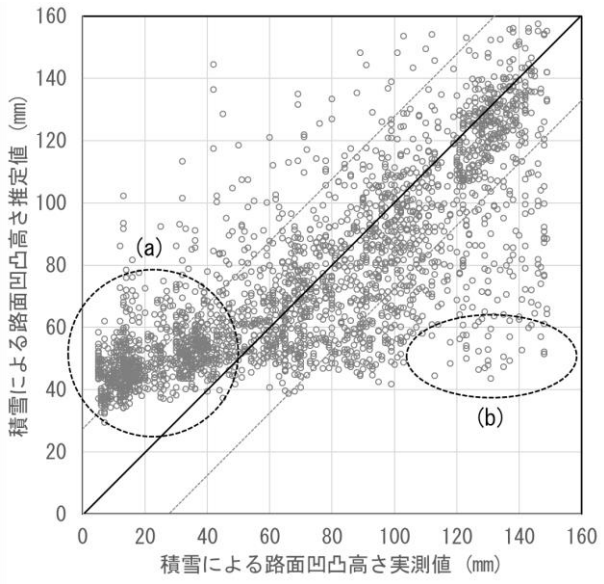


図-2　積雪による路面凹凸高さの実測値と推定値の比較



(a)乾燥したアスファルト舗装
（路面凹凸高さ：12mm）

(b)積雪路面
（路面凹凸高さ：173mm）

図-3　乾燥したアスファルト舗装と積雪路面の画像の比較

に積雪がある場合と積雪がない場合のデータが含まれており，積雪がない路面において CNN が路面に積雪があるものと判断し路面凹凸高さを過大に見積もった可能性がある．本研究で収集した 3 次元路面形状データでは，積雪がない路面における D_{obs} は概ね 20mm 以下である一方積雪がある路面における D_{obs} は 40mm 以上となる例が多く見られた．また，**図-3** に示すように乾燥条件下かつ施工後長い時間が経過したアスファルト舗装は泥などが混入した積雪路面と類似した色調となる場合がある．本研究で作成した CNN では乾燥したアスファルト舗装に見られる特徴と積雪路面に見られる特徴を判別することに失敗し，入力した画像は非積雪路面であるにもかかわらず積雪路面における路面凹凸深さの値を推定結果として出力したものと推察される．

また，D_{obs} が 120mm 以上である条件下では大部分の精度検証用データで D_{est} は D_{obs} と同程度の値となったが，一方で約 15%の精度検証用データでは D_{est} が 60mm 未満となり積雪による路面凹凸高さを大幅に小さく見積もった（**図-2(b)**）．この理由としては，D_{obs} が 120mm 以上である場合の学習用データには Data augmentation により追加した路面画像データが含まれており，D_{obs} が 120mm 未満である場合の学習用データと比較して路面画像の多様性が乏しいために CNN の頑健性が低下した可能性が考えられる．

4.　おわりに

本研究では冬期道路における交通障害やサービスレベル低下の原因となる積雪時の路面凹凸について，路面画像から深層学習を用いて積雪時の路面凹凸高さを推定する手法を開発した．併せて，積雪時の路面凹凸高さを推定する畳み込みニューラルネットワークの学習用データ収集方法を提案した．また，本研究で提案した手法により作成した深層学習モデルを用いて積雪時の路面凹凸高さの推定精度検証を行った．得られた知見を以下に示す．

- LIDAR センサで得られた 3 次元点群データを 3DCG として描画し仮想的なカメラからの撮影位置や角度を変化させて路面画像と路面の 3 次元形状データを得ることで，積雪時の路面凹凸高さを推定する深層学習モデルの学習に必要となるデータを大量に取得することが可能となった
- 上記手法で得られた学習用データを基に積雪時の路面凹凸高さを推定する深層学習モデルを作成し推定精度を検証した結果，路面画像のみから積雪による路面凹凸高さを定量的に推定できる可能性があることが明らかとなった

今後は路面に積雪がない場合および積雪による路面凹凸高さが非常に大きい場合の学習用データを追加で収集するとともに，路面画像以外に気象条件などを入力データとするマルチモーダル AI[10]の開発により積雪による路面凹凸高さの推定精度改善を試みる．また，学習用データを作成する際の仮想的なカメラを路面から高い位置に設定し，得られたデータを用いて積雪時の路面凹凸高さを推定する深層学習モデルを作成することで道路 CCTV カメラから得られた画像を基に積雪時の路面凹凸高さを推定する手法を開発する．

参考文献

1) 村田晴彦，河島克久：雪による車両滞留イベントデータベースの構築とそれを用いた発生特性の分析，雪氷， Vol.84， No.6，pp.515-527，2022.
2) 齊田光，徳永ロベルト，大浦正樹，佐藤信吾，佐藤昌哉：冬期走行環境が走行速度に及ぼす影響の評価に向けた長期計測試験，寒地技術論文・報告集，CD-ROM，2018.
3) 徳永ロベルト，高橋尚人，浅野基樹，櫻庭満：「2005 ふゆトピア・フェア in 旭川」における冬期凍結歩道のモビリティ実験について，第 18 回ゆきみらい研究発表会論文集，2006.

4) 藤本明宏，河島克久，渡部俊，村田晴彦：大雪時のスタック車両発生メカニズムの解明，雪氷，Vol.83，No.5，pp.507-522，2021.
5) 北畑裕貴，大野和則，鈴木高宏，田所諭：自動運転のための道路上の積雪の認識に関する研究，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集，1A1-G01，2015.
6) 国土交通省：3 次元計測技術を用いた出来形管理要領（案），https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001612930.pdf.（2023/10/11 閲覧）
7) 中村一樹，砂子宗次朗，上石勲，宮島亜希子，仲条仁：スマートフォン AI 路面判別システムの開発，雪氷研究大会（2022・札幌）講演要旨集，p.126，2022.
8) Qian-Yi Zhou, Jaesik Park and Vladlen Koltun: Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing, arXiv preprint arXiv:1801.09847, 2018.
9) Mingxing Tan and Quoc V. Le： EfficientNetV2: Smaller models and faster training, Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning, PMLR 139:10096-10106, 2021.
10) 例えば；諸戸祐哉，前田圭介，藤後廉，小川貴弘，長谷山美紀：テキストおよび画像情報に基づく Focal Loss を導入した深層学習による冬期路面状態の分類，AI・データサイエンス論文集，Vol.3，No.J2，pp.293-306，2022.

THE ESTIMATION METHOD OF SNOW BUMP HEIGHT ON ROAD USING A ROAD IMAGE AND THE DEEP NEURAL NETWORK

Akira SAIDA, Tomonori OHIRO, Kota OKUMURA, Yasuhiko ITO and Shin-ei TAKANO