

# ディープラーニングによる路面画像認識を用いた ロードヒーティングの制御システム

Development of a Road-Heating Controller  
with Image Recognition of Ground Surface by Deep Learning

横山 想一郎\*<sup>1</sup>  
Soichiro YOKOYAMA

山下 倫央\*<sup>1</sup>  
Tomohisa YAMASHITA

川村 秀憲\*<sup>1</sup>  
Hidenori KAWAMURA

武田 清賢\*<sup>2</sup>  
Kiyotaka TAKEDA

横川 誠\*<sup>2</sup>  
Makoto YOKOGAWA

\*<sup>1</sup>北海道大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

\*<sup>2</sup>北海道ガス株式会社

Technogoly Development Institute, Hokkaido Gas Corporation

A control method for a road-heating system by image recognizing of ground surface is proposed. Road-heating systems melt snow by heating up ground surface to remove obstructive snow without the need for time and effort consuming snow shoveling. However, since current road-heating systems are commonly controlled by snowfall sensors which can be unnecessarily activated by light snow or rainfall, they are not widely used due to fuel cost. An CCD camera and image recognition algorithm which accurately decides whether the ground surface is covered by snow can solve the problem in an inexpensive way. We utilize deep learning techniques to accomplish such a image recognition algorithm. Road-heating controllers with camera and the image recognition algorithm are tested at multiple places in Sapporo City, Hokkaido. The results shows that operating time of road-heating systems are reduced by more than 20% without any trouble in melting snow.

## 1. はじめに

ロードヒーティングとは、道路の融雪を目的として路面の温度を上昇させる設備であり、北海道を始めとして冬期間に積雪が見られる地域で広く利用されている。路面を温める熱源のエネルギーとしては、石油や電気、ガスなどが使われているため、その利用効率を高めることは、経済的、環境的に重要な課題である。

一般的に利用されている制御方法として、高所に取付けた降雪センサが降雪を感知した際に、タイマーによって一定時間だけ熱源を稼働させる方法が挙げられる。しかし、この方法は路面の積雪状態を制御対象としているにも関わらず、降雪状態を感知しているために、正確な制御が困難である。このため、実際の利用シーンでは、路面に雪がないのに熱源を稼働させ続けたり、積雪が残っているのにタイマーにより熱源を停止されたりといった問題が発生している。

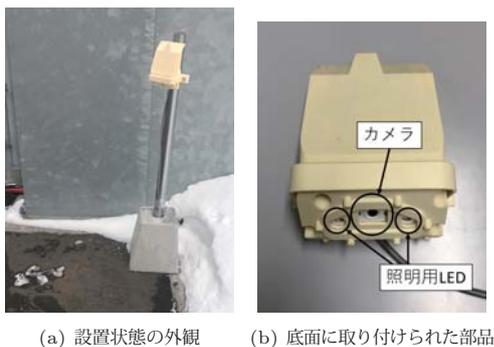
こうした問題に対し、ロードヒーティングの効率的な制御を低コストに実現するため、CCDカメラにより融雪対象の路面画像を撮影し、画像認識により積雪状態を認識し、それによって熱源の稼働を決定するシステムの研究が行われている[1]。画像認識により積雪状態を認識する方法は、画像処理を正確に行うことができれば、降雪センサを用いる方法と比べ、熱源の稼働時間を削減可能であることが確認されている。一方で、路面画像から積雪状態を認識する際の精度がロードヒーティング制御の効率に直結するため、幅広い路面に対応可能な画像処理方法の確立が課題とされている。

本研究では、ロードヒーティングを効率的に制御するため、CCDカメラにより撮影した路面画像の認識にディープラーニングを利用するシステムを提案し、その有効性を検証する。著連絡先: 横山 想一郎, 札幌市北区北14条西9丁目北海道大学大学院情報科学研究科9階 調和系工学研究室, E-mail:yokoyama@complex.ist.hokudai.ac.jp

者らはこれまでの研究において、利用が想定される様々な路面状態の画像をディープラーニングにより学習させることで、路面の雪の有無を98%程度の精度で判定できることを検証し、その画像認識に基づいてロードヒーティングを制御することで、熱源の稼働時間を削減可能であることを示した[2]。これを受けて、本研究では、路面画像の撮影、ディープラーニングを用いた積雪状態の認識、熱源への稼働信号の送信を行うことが可能なロードヒーティングコントローラを開発した。ディープラーニングによる路面状態の学習が、実用上の様々な路面状態で利用可能な頑健性を持つことを確認するため、開発したコントローラを札幌市内の14箇所に設置した。設置したコントローラのうち9箇所で画像認識によるロードヒーティング制御を実施し、5箇所のデータを用いて熱源の稼働時間の削減効率を検証した。その結果、開発したロードヒーティングコントローラを適切に運用することで、2月下旬～3月上旬の札幌市内において、熱源の稼働時間を25%削減可能であることを示し、ディープラーニングによる路面画像認識の有効性を明らかとした。

## 2. 関連研究

CCDカメラにより撮影した路面画像から積雪状態を認識し、ロードヒーティングの制御に利用するシステムが、後藤らによって提案されている[1]。後藤らは路面画像の輝度分布を解析し、濃度拡張処理を施して適切なしきい値を設けることで、積雪状態を認識している。路面画像の画像処理によるロードヒーティングの制御方法を、従来の降雪センサによる方法と比較検証し、画像処理による方法は、降雪センサよりも効率的な制御を、赤外線などにより路面の状態を観測する方法と比べ低コストで実現可能であることを示した。一方で、積雪認識に輝度の情報を用いることから、自然石や施工後間もない白いセメントコンクリートなどの適用性が検討課題として残り、アス



(a) 設置状態の外観 (b) 底面に取り付けられた部品

図 1: ロードヒーティングコントローラ

ファルト舗装でない路面に対して汎用的に積雪状態を認識することのできる方法の開発が課題とされている。

一方で、近年、ディープラーニング（深層学習）による方法が、画像処理の様々な課題に置いて効果的であることが広く検証されている。特に、一般物体認識や手書き文字認識において、従来の画像認識アルゴリズムを大きく上回る性能を示すことが確認されている。画像分類にディープラーニングを利用する際には、畳み込み構造をもつ多層の人工ニューラルネットワークが用いられる。機械学習に基づき、分類が既知のデータを大量に教師データを学習することで人工ニューラルネットワークの適切な結合を発見する。

路面画像の積雪状態の分類をディープラーニングにより学習することで、路面の質感や陰影に基づく積雪状態の判定基準が獲得され、輝度のみにより積雪を判断する場合と比べ多種多様な路面において頑健な積雪判定が獲得されることが期待される。このためには、様々な路面において、多様な路面状態や照明条件の基で画像を撮影し、教師データを収集しなくてはならない。これは、ロードヒーティングコントローラを設置予定の場所に冬期間に CCD カメラを設置し、昼夜や気象条件を問わず一定の間隔で路面画像を撮影することにより、容易に実現可能である。以上の理由から、本研究ではディープラーニングを用いた画像認識を採用する。

### 3. ロードヒーティングコントローラ

本研究で開発するロードヒーティングコントローラは図 1(a)のように設置される。コントローラ内部には Raspberry Pi 3 及び LTE モデムが搭載され、本体底面に取り付けられた Raspberry Pi Camera Board V2 により路面画像を撮影する。また、カメラの横には照明用の LED が取り付けられ、夜間でも路面の状況を確認できるように、撮影時に点灯する。撮影される路面の範囲はおおよそ 1m 四方であり、ロードヒーティングが設置されている区域の全体を捉えることはできない。このため、熱源に近く稼働後に雪がすぐに溶けてしまう箇所や、熱源から遠く必ずしも融雪が必要でない箇所を避け、ロードヒーティングによる加熱の効果が典型的に現れる箇所を撮影範囲として設置する。搭載された LTE モデムを利用することで、遠隔地から撮影された路面画像や積雪状態の認識結果などからコントローラの稼働状況を確認したり、コントローラの動作を司るソフトウェアを更新したりすることが可能となり、札幌市内に配置されたコントローラを容易に管理することができる。コントローラには、稼働用の電源入力、熱源稼働の可否の信号を送信するための出力、従来の降雪センサ及びタイマーによる熱源稼働の可否の信号を受け取るための入力の 3 種類が接続

される。従来の降雪センサなどに基づく信号は、カメラなどに不具合が生じた際に熱源稼働を判断するための予備の判断材料や、画像認識による熱源稼働時間の削減効果を検証するためのデータとすることを目的として取得する。

コントローラはカメラの撮影する画像から路面の積雪状態を監視し、積雪がある場合に熱源の稼働を開始する。熱源の稼働中に積雪が見られなくなった場合は、撮影範囲外の融雪が完了していない可能性や、路面画像に障害物が映り込むことによる積雪状態の誤認識の可能性を考慮し、一定時間だけ余分に熱源を稼働させ続けた後に停止する。同様に熱源の停止中は、一定の回数だけ連続して路面画像から積雪が認識された場合のみ熱源の稼働を開始する。こうした動作を実現するため、コントローラは以下の手順を繰り返すことでロードヒーティングを制御する。

1. 熱源を停止し積雪認識回数のカウンタ  $c$  に 0 を代入して初期化する。
2. 本体下部のカメラを用いて路面の画像を撮影する。
3. 画像認識により雪に覆われた路面の割合  $r$  を計算する。
4.  $r > 0.6$  を満たすとき  $c$  を 1 だけ増加する。
5.  $c \geq 5$  かつ熱源が停止中の場合、熱源の稼働を開始する。
6.  $r < 0.5$  を満たすとき  $c$  に 0 を代入する。
7.  $r < 0.5, c = 0$  かつ熱源が稼働中の場合、熱源の停止タイマーを 2 時間にセットしカウントダウンを開始する。
8. 熱源停止タイマーの残り時間が 0 を指している場合、熱源の稼働を停止する。
9. 2. に戻る

#### 3.1 ディープラーニングを用いた画像認識

ロードヒーティングコントローラのカメらは 1024x768 ピクセルの画像を撮影し、これに基づいて積雪認識が行われる。撮影された画像は 64x64 ピクセルの部分画像に重なりなく分割され、それぞれの部分画像に対して、ディープラーニングにより学習された畳み込みニューラルネットワークにより、0~1 の実数値により積雪状態の認識が行われる。畳み込みニューラルネットワークの出力値を各部分画像に対して計算し、その平均値を雪に覆われた路面の割合とみなす。

ディープラーニングを用いた画像認識には、ネットワーク構造として Network in Network[3]を採用し、予め収集された教師データをもとに NesterovAG[4]で学習することでパラメータを獲得している。これは、ディープラーニングによる路面画像の積雪状態分類の学習方法を比較検討した著者らの既存研究のなかで、最も精度の高いネットワークが得られる条件に基づいて決定された [2]。学習に利用するデータとしては、2016 年~2017 年にかけて撮影された 24000 枚の画像に加えて、2017 年 11 月から 2018 年 1 月 21 日までに札幌市内のロードヒーティングコントローラ設置地点で定期的に撮影することで 30000 枚を収集した。これらの画像に対して積雪の有無を目視により判定した後に、ディープラーニングによる学習を実施した。4 分割交差検証により、検証データに対して 98%以上の精度が得られることを確認した後に、収集された全データを基に学習を実施し、獲得されたニューラルネットワークにより実証実験中の積雪認識を行うこととした。

表 1: 実証実験中に撮影された画像の枚数

		画像認識の出力値平均			
		[0,0.25]	(0.25,0.5]	(0.5,0.75]	(0.75,1]
画像の割合	わける [0,0.25]	942	173	10	4
	れた雪に (0.25,0.5]	8	83	10	0
	割部分 (0.5,0.75]	0	3	32	4
	分覆にお (0.75,1]	0	1	27	145

表 2: ロードヒーティングの熱源稼働時間

地点	項目	2/24	2/25	2/26	2/27	2/28	3/1	3/2	3/3	3/4	合計
	1日の降雪量合計 (cm)	0	0	0	1	0	26	7	0	0	
	最高気温 (°C)	-1.2	-2.3	-1.1	-0.7	0.4	1.6	3.4	3.7	10.2	
A	制御システム稼働時間 [h]	-	-	-	23.5	23.7	23.5	23.8	23.7	23.6	141.8
	熱源稼働時間 (降雪センサ) [h]	-	-	-	1.8	0.0	16.2	9.2	0.0	0.0	27.2
	熱源稼働時間 (画像認識) [h]	-	-	-	1.5	0.0	13.5	1.9	0.0	0.0	16.9
	削減率 [%]	-	-	-	18.2	-	16.7	79.3	-	-	38.0
B	制御システム稼働時間 [h]	23.7	23.9	23.7	23.7	23.8	23.7	23.9	23.9	23.8	214.2
	熱源稼働時間 (降雪センサ) [h]	0.0	0.0	2.7	3.7	7.6	16.9	17.5	2.7	0.0	51.0
	熱源稼働時間 (画像認識) [h]	0.0	0.0	5.4	5.4	0.0	16.5	11.8	0.0	0.0	39.1
	削減率 [%]	-	-	-101.9	-46.1	100.0	1.9	32.5	100.0	-	23.4
C	制御システム稼働時間 [h]	23.9	23.9	23.8	23.8	23.8	23.9	23.8	23.8	23.9	214.8
	熱源稼働時間 (降雪センサ) [h]	2.6	0.0	3.9	4.4	7.8	15.1	19.4	0.0	0.0	53.3
	熱源稼働時間 (画像認識) [h]	3.4	0.0	6.1	5.4	0.0	16.5	8.9	0.0	0.0	40.3
	削減率 [%]	-30.5	-	-53.9	-23.3	100.0	-9.0	54.4	-	-	24.4
D	制御システム稼働時間 [h]	23.8	23.9	23.8	21.8	23.7	23.9	23.8	23.9	23.8	212.5
	熱源稼働時間 (降雪センサ) [h]	0.0	0.0	3.2	4.3	8.6	15.2	17.9	0.0	0.0	49.1
	熱源稼働時間 (画像認識) [h]	3.4	0.0	10.6	8.3	0.0	16.3	23.8	12.9	0.0	75.4
	削減率 [%]	-	-	-232.9	-95.0	100.0	-7.5	-33.0	-	-	-53.4
E	制御システム稼働時間 [h]	23.8	23.2	23.7	23.5	23.8	23.7	-	-	-	141.7
	熱源稼働時間 (降雪センサ) [h]	5.2	0.9	4.7	2.5	2.1	14.7	-	-	-	30.1
	熱源稼働時間 (画像認識) [h]	5.2	0.0	3.5	1.3	2.2	10.5	-	-	-	22.8
	削減率 [%]	-0.2	97.2	25.8	47.0	-1.1	28.2	-	-	-	24.4

また、積雪状態を高速に認識するため、いくつかの部分画像を判定した後に、ほぼすべての画像画像に対して同一の判定がなされた場合には、残る部分画像に対する畳み込みネットワークの適用を省略する。具体的には、ランダムに選ばれた50枚の部分画像に対して畳み込みネットワークの出力値を計算し、その値の平均値が0.5および0.6と有意に異なるか、t検定を実施する。0.5および0.6の双方との間で有意差が見られた場合は、計算した部分画像のみの出力値の平均を用いてコントローラの動作を決定する。有意差が見られない場合には、未計算の部分画像1枚に対して畳み込みネットワークの出力値を計算し、再びt検定を行う。これを、すべての部分画像の出力値が計算されるか、有意差が検出されるまで繰り返し実行する。

#### 4. 実証実験

前節のロードヒーティングコントローラを札幌市内の14箇所に設置し、2018年2月22日より画像認識によるロードヒーティングコントローラの実証実験を行った。設置したロードヒーティングコントローラのうち、4箇所は従来の降雪センサとタイマーによる制御の際に、路面の雪を完全に溶かさないうように熱源稼働させていることが判明した。これは、燃料費の節約のためと考えられ、路面の積雪状態を解消することを目的として制御を行う本研究の提案方法と相反した目的を持つ。ま

た、他の1箇所においてロードヒーティングの設備の施工不良のため、画像認識によるロードヒーティングの制御が不可能であることが判明した。以上からこれら5箇所を除いた9箇所画像認識によるロードヒーティング制御を実施した。

ディープラーニングを用いた画像認識アルゴリズムが路面の積雪状態を正しく認識していることを検証するため、実証実験中に撮影された画像に対する認識の精度を検証する。正答例を得るため、2018年2月24日から2018年3月5日までに5箇所画像認識によるロードヒーティング制御を実施した。ディープラーニングを用いた画像認識アルゴリズムが路面の積雪状態を正しく認識していることを検証するため、実証実験中に撮影された1442枚の路面画像に対し、画像認識アルゴリズムを適用する場合と同様に64x64ピクセルの部分画像に分割し、各部分画像において路面が露出しているか否かのアノテーションを、著者らの判断により付与した。付与されたアノテーションに基づき雪に覆われた路面の割合を算出し、画像認識アルゴリズムの出力結果と比較した結果を表1に示す。表1は、各行でアノテーションに基づく積雪の割合を4段階に、各列で画像認識アルゴリズムの出力結果を4段階に分割し、それぞれの区分に該当する路面画像の枚数を表す。ここから、路面画像から積雪が確認できるにも関わらず積雪がないと誤認識した画像が4枚(0.3%)、積雪が確認できないにも関わらず積雪ありと誤認識した画像が24枚(1.7%)存在することがわかる。誤認識が発生した画像を検証したところ、1枚を除くすべての画像において、画像中の4割~6割ほどの面積で積雪がみられるか、あるいは画像全体を薄く雪が覆っている状態であること

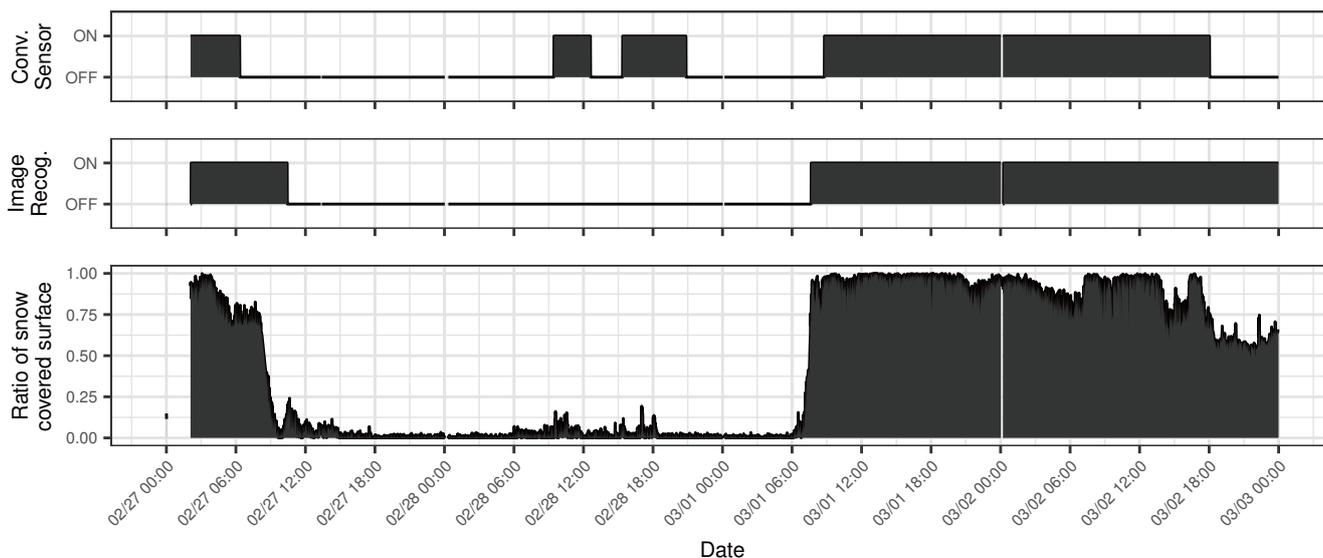


図 2: 地点 D における 2018 年 2 月 26 日から 2018 年 3 月 2 日までの路面状況認識結果および熱源稼働状況

が確認された。こうした画像は積雪中・融雪中に見られ、時間経過により正しく積雪を認識できる状態に変化することから、ロードヒーティング制御に対する悪影響は見られなかった。残る 1 枚は画面全体で積雪が確認できるにも関わらず、画像認識アルゴリズムは 4 割ほどの積雪と判断したものの、その前後に撮影された画像では正しく積雪を認識することができていたため、熱源が誤って停止することはなかった。以上から、今回用いた画像認識アルゴリズムは、ロードヒーティング制御にあたり路面の積雪状態を正しく認識していたと言える。

実証実験を行った 9 箇所のうち、データの回収が可能であった 5 箇所での、2018 年 2 月 24 日から 2018 年 3 月 5 日までの熱源稼働時間を表 2 に示す。実証実験期間中に回収されたデータ内でのロードヒーティングコントローラの総稼働時間、路面画像を用いる提案方法により実際に熱源を稼働した時間、同一期間に従来の降雪センサとタイマーにより熱源の稼働を決定と仮定した場合に熱源が稼働されていた時間、提案方法による熱源稼働時間の従来方法を仮定した熱源稼働時間に対する増加率をそれぞれ示す。上述の通り、路面画像から積雪状態が正しく認識されていたことから、実証実験期間中のこれらの 5 箇所において雪の溶け残りは観察されなかった。表 2 から、D 地点を除き提案方法は全体として 20%以上の熱源稼働時間削減を実現していたことがわかる。図 2 には、D 地点における積雪状態の認識結果および熱源稼働状況を示す。全体の傾向として、気温が低く降雪量の少ない 2/24~2/27 期間に熱源の稼働時間が増加している。これは、少量の雪が降り路面を薄く覆った場合に、路面画像から積雪を認識したためである。実際には、少量の雪であれば熱源を稼働する必要はないため、従来の降雪センサからの入力を熱源稼働の判断基準に加え、カメラと降雪センサの双方が検知した場合のみ熱源を稼働させることで、さらなる稼働時間の削減が見込める。気温の比較的高い 2/28 以降には、稼働時間が削減される傾向にあった。これは、降雪後すぐに雪が溶けてしまい、路面に積雪がない状況において、熱源の稼働が必要が無いことを正しく認識したためである。D 地点の 3/2 において、提案方法の熱源稼働時間が長かった理由は、実証実験期間中に特に多量の積雪があり、路面画像中のロードヒーティングによる熱源が弱い場所に雪が残り

続け、その雪を画像中で認識したためである。これは、積雪状態を認識する路面の範囲を、実際に融雪が必要な範囲に正しく限定することで対処可能である。

## 5. おわりに

本研究では、ロードヒーティングを効率的に制御するため、CCD カメラにより撮影した路面画像の認識にディープラーニングを利用するシステムを提案し、その有効性を検証した。路面画像の認識により熱源の稼働を決定するロードヒーティングコントローラを開発し、コントローラを札幌市内の 14 箇所に設置した。設置したコントローラのうち 9 箇所画像認識によるロードヒーティング制御を実施し、5 箇所のデータを用いて熱源の稼働時間の削減効率を検証したその結果、開発したロードヒーティングコントローラを適切に運用することで、2 月下旬~3 月上旬の札幌市内において、熱源の稼働時間を 25%削減可能であることを示した。

## 参考文献

- [1] 後藤隆一郎, 濱田靖弘, 窪田英樹, 中村真人, 長田勉: 画像解析を導入した路面融雪運転制御システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.103, 2005, pp.29-36
- [2] 小山望海, 横山想一郎, 山下倫央, 川村秀憲, 武田清賢, 横川誠: 畳み込みニューラルネットワークを用いた積雪状態の認識とロードヒーティングの制御, 情報処理北海道シンポジウム 2017, 14, 札幌 (2017)
- [3] Lin, Min, Qiang Chen, and Shuicheng Yan. "Network in network." arXiv preprint arXiv:1312.4400 (2013).
- [4] Bengio, Yoshua, Nicolas Boulanger-Lewandowski, and Razvan Pascanu. "Advances in optimizing recurrent networks." Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013.