

深層学習を用いた画像認識技術の開発と地球科学への応用

課題責任者

松岡 大祐

海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門
情報エンジニアリングプログラム

著者

松岡 大祐*¹, 日高 弥子*¹, 杉山 大祐*¹, 村上 幸史郎*¹

*¹ 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 情報エンジニアリングプログラム

深層畳み込みニューラルネットワークを用いた画像認識技術は、空間パターンの特徴抽出において威力を発揮し、近年、地球科学の諸問題においても活用が進んでいる。本課題では、特に物体検出・回帰・クラス分類、物理量変換、異種データ融合、低解像度画像の高解像度化について、基盤技術を開発するとともに応用研究を行うことで、新たな展開を模索することを目的としている。R3年度の主な成果として、セマンティック・セグメンテーションを用いた海岸画像からの漂着ごみ検出と定量化技術を開発することで、地上からデジタルカメラ等で撮影された写真から、人工漂着ごみおよび自然漂着ごみをピクセル単位で検出した。また、検出結果を上空から撮影した構図に射影変換することで、漂着ごみの被覆面積を高精度に推定することに成功した。その他の成果として、気象シミュレーションデータから熱帯低気圧の前駆体となる雲を高精度に検出するためのクラス分類手法を開発した。特に、対象クラスのデータ数に20倍程度の不均衡が存在する場合において、多数派クラスの効率的なサンプリングや、少数派クラスの水増しを行うことで、高い分類精度を得ることが可能となった。

キーワード: 畳み込みニューラルネットワーク, クラス分類, セマンティック・セグメンテーション, 海ごみ, 熱帯低気圧

1. はじめに

多層化されたニューラルネットワークを用いた機械学習の一手法である深層学習(Krizhevsky et al. 2012[1])は、近年、地球科学の各分野においても活用が進んでいる。特に画像の認識に特化した深層畳み込みニューラルネットワークは、空間的なパターンを検出するのに優れ、海洋や気象、地震等の研究においても親和性が高い。例えば、雲画像からの雲量推定(Onishi and Sugiyama 2017[2])、気象シミュレーションデータからの熱帯低気圧の予兆検出(Matsuoka et al. 2018[3])や、地震動と低周波微動シグナルの自動判別(Nakano et al. 2019[4])、大気重力波のダウンスケーリング(Matsuoka et al. 2020[5])等においても、深層畳み込みニューラルネットワークが応用されている。

深層学習を用いた画像認識は、技術の進展が非常に早い分野であり、地球科学への応用においても多くの余地が残されている。一方で、地球科学データを用いた画像認識において、自然画像とは異なるデータの取り扱いの特殊性や独自のノウハウ等が存在する。本課題は、深層学習を用いた画像認識の最新技術を地球科学分野に積極的に導入するとともに、分野共通の課題やノウハウを整理し、新たな展開を模索することを目的としている。

本課題が対象とするテーマは、地球科学に活用画像認識の①物体検出・回帰・クラス分類、②物理量変換、③異種データ融合、④低解像度画像の高解像度化の4つである。R3年度の成果として、テーマ1に関連するセマンティック・セグメンテーションを用いた海岸画像からの漂着ごみ検出と、熱帯低気圧の検出における不均衡データの効率的なクラス分類について報告する。

2. セマンティック・セグメンテーションを用いた海岸漂着ごみの検出

近年、陸域において棄てられた大量のごみ(プラスチック含む)が海洋を経て海岸に漂着し、社会的に大きな問題となっている。これまで、海岸における漂着ごみの実態調査が世界中で進められてきた。例えば、ドローンによる空撮画像に対して深層学習を用いた画像解析を適用することで、海岸漂着ごみの体積推定(Kako et al. 2020[6])や、個数推定および分類(Martin et al. 2021[7])を行った例等が報告されている。ドローンを用いた観測は短時間で広域の観測を可能にする一方で、求められる技術レベルやコストの高さ、撮影頻度の低さ等が課題となっていた。

本研究では、デジタルカメラ等で簡易的に撮影された海岸の写真に対して画像解析を行うことにより、汎用性と実用性に優れた海岸漂着ごみの定量情報化を目指した。地上から撮影された写真に対する画像解析技術として、入力画像に対してピクセル単位でクラス分類を行うセマンティック・セグメンテーション(Long et al. 2016 [8]; San et al. 2019 [9]; Wang et al. 2021 [10])を採用した。分類クラスとして、ペットボトルや缶、木材等の人工漂着ごみ、流木や海藻等の自然漂着ごみの他、砂浜、海、空、植物、設置物、背景の8種類を設定した。ここで、各クラスに特有のパターン(色や模様、形状等)を学習するためには、海岸の写真と、ピクセル単位でクラス毎に塗り分けられた正解ラベルのペアが必要となる。本研究では、山形県庄内総合支庁から提供を受けた海岸清潔度モニタリング写真3500枚に対して正解ラベルを作成した(図1)。3500枚のペア画像のうち、2800枚を訓練用データ、700枚を評価用データとした(Hidaka et al. 2022 [11])。

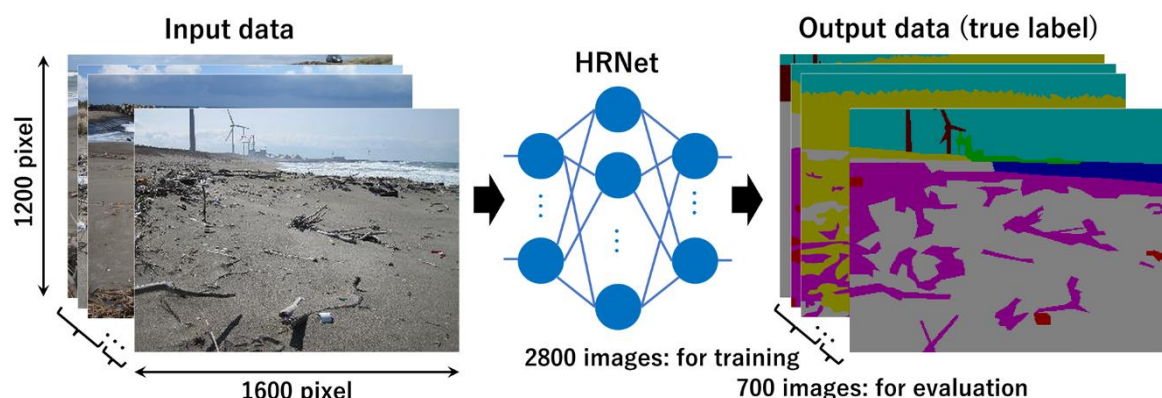


図1. セマンティック・セグメンテーションを用いた海岸画像からのごみ検出のイメージ図(Hidaka et al. 2022 [11]より転載)。正解ラベル画像内の各ピクセルのうち、赤および紫が人工漂着ごみおよび自然漂着ごみを示す。

評価用データ 700 枚を用いた精度検証では、画像中の人工漂着ごみを示すピクセルのうち 30-70%、自然漂着ごみを示すピクセルのうち 40-80%程度を正しく検出するという結果が得られた。このうち、木材（人工漂着ごみ）と流木（自然漂着ごみ）を間違えたケース等も含めて、2種類のごみを 1 クラスにまとめた場合は、60%-90%程度の検出精度となる。図 2 に入力画像および推定結果を付与した画像の一例を示す。入力画像（図 2(a)）は、タイのサメサン島の海岸において撮影された写真である。この例は学習データとして用いた画像と比べると、構図や風景、ごみのサイズ等が異なるが、推定画像（図 2(b)）ではおおむね正しく各ピクセルが分類されており、画像手前の透明の瓶やペットボトル等も正しく検出されている。

開発手法は、画像内の漂着ごみのピクセル数をカウントするだけでなく、漂着ごみの被覆面積の推定に活用することも可能である。ドローンを用いて空撮した海岸画像から目視で検出した人工ごみの面積を真値として行ったケーススタディでは、地上撮影写真からも 1 割程度の誤差で被覆面積を推定することに成功した。本手法では、地上写真を空撮写真と同様の構図に射影変換するとともに、画像のサイズを実際のスケールに対応づける必要がある。そのためには、撮影する際のカメラの画角や、画像底辺までの距離等の情報が必要となる。

本研究において用いたセマンティック・セグメンテーション用の学習データセットは、データリポジトリを通じて無償（ただし学術目的の利用に限る）で公開されている(Sugiyama et al. 2022 [12]; Sugiyama et al. 2022 [13])。海洋環境評価や情報科学等の分野における研究の促進を目的とし、広く活用されることが期待される。今後、さらに海岸漂着ごみの体積の推定や、プラスチックごみの個数のカウント等にも発展させる予定である。

3. クラス分類を用いた雲画像の分類

画像のクラス分類は、手書き文字や人の顔、動物や乗り物のカテゴリ分類においても活用される、最も基本的な画像認識タスクの一つである。気象データに対しては、対象とするエリア内における台風等の熱帯低気圧や前線、

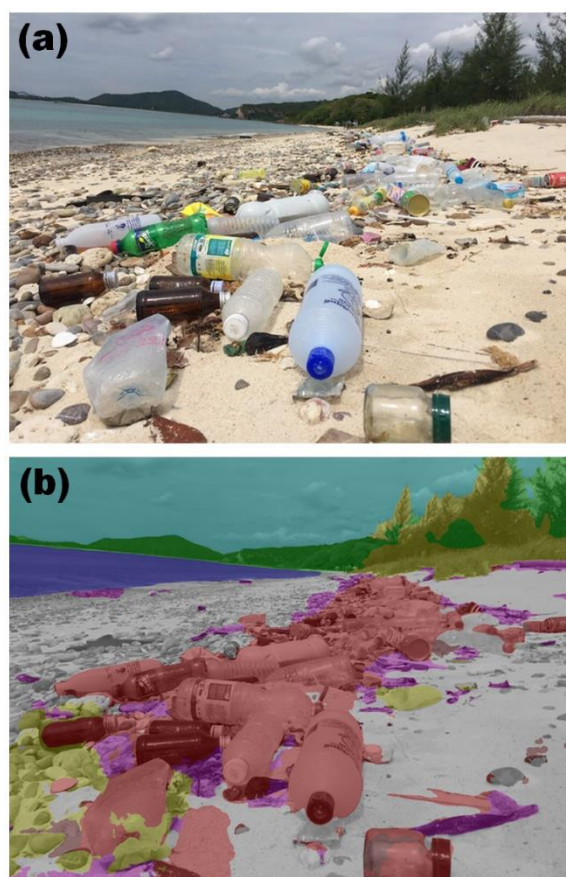


図2. セマンティック・セグメンテーションを用いた海岸画像からのごみ検出結果(Hidaka et al. 2022 [11]より転載)。

大気の河等の有無を分類予測することに用いられている(例えば Matsuoka et al. 2018[3])。一方で、このような発生頻度の少ない、いわゆる極端気象現象は事例数が極めて少ないため、各クラス間のデータの不均衡さが分類予測の精度を低下させる一因となっている。本研究では、先行研究(Matsuoka et al. 2018 [3])において用いた 2 クラス分類

用データを使用し、不均衡データの高精度なクラス分類手法の開発に取り組んだ。本研究において開発した手法および成果(Matsuoka, 2021 [14]; Matsuoka, 2022 [15])について紹介する。

使用したデータは、雲解像モデル NICAM による 30 年分の気候シミュレーション結果(Kodama et al. 2015 [16])である。同データに対して、熱帯低気圧のトラッキングアルゴリズムを適用することにより、前駆体を含む熱帯低気圧の画像（以下、正例画像）とそれ以外の雲画像（以下、負例画像）を切り出した（図 3）。画像のピクセル数（グリッド数）は 64×64 、実スケールにすると約 $1000\text{km} \times 1000\text{km}$ である。特筆すべき点として、正例画像が約 10 万枚であるのに対し、負例画像は約 200 万枚という、20 倍程度の不均衡にある。

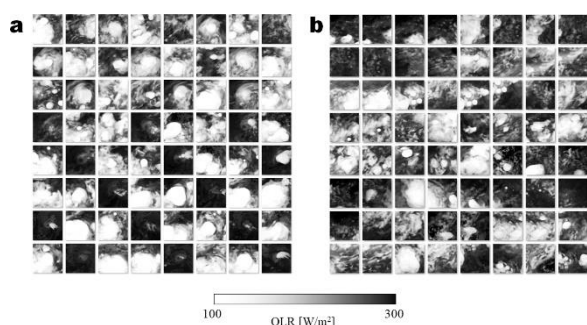


図3. 気候シミュレーションデータから切り出した 2 クラスの雲画像(a)熱帯低気圧、(b)それ以外の雲画像 (Matsuoka, 2021 [14]より転載)。

不均衡な 2 クラス画像の分類予測を行うため、深層畳み込みニューラルネットワークを用いた機械学習モデルを構築した。ここで用いたアプローチは、(1)データのサンプリング、(2)アンサンブル学習、(3)先進的な深層学習手法の活用である。(1)では、少数派クラスである正例画像に対し、画像の（上下または鉛直方向の）反転、回転、部分的な切り出し、部分的なノイズ付加等を用いることによって、画像数を 5 倍に増加させた（データ拡張）。また、多数派クラスである負例画像に対しては、分類困難な事例を多めにサンプリング(hard negative sampling)し、分類精度の向上を図った。(2)では、Hard negative のサンプリング率を変えた異なる 5 つも分類モデルを構築し、それらによる分類結果の重み付き平均を最終的な結果とする学習を行った。テスト時においては、異なるデータ拡張手法による 5 種類の異なる画像を入力として与える Test Time Augmentation を用いた。(3)では、ResNet や WideResNet、PyramidNet 等の深層学習アーキテクチャを用いることで、大量データの効率的な学習を図った。これらは Residual Block を採用することで、多層ネットワークであっても効率的に誤差を逆伝播させる仕組みである。また、少数派クラスの予測に重みを置く Focal Loss 等の損失関数や、誤差の消失を防ぐ Reaky ReLU 等の活性化関数の活用を行った。

208 種類のモデルを用いた際のテストデータに対する分類精度（再現率および適合率）を図 4 に示す。再現率 (Recall)は、真値が正例であるもののうち、正しく正例であると分類できた割合である。適合率(Precision)は、正例であると分類したもののうち、真値も正例であった割合である。最も精度の高かったモデルでは、Recall=0.80 のとき、Precision=0.66 であり、従来手法(Matsuoka et al. 2018 [3])による結果と比較して 65.4%の精度向上に成功した。

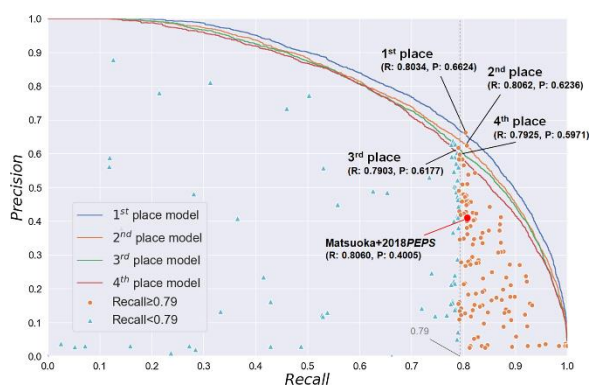


図4. テストデータに対する分類精度(Matsuoka, 2021 [14]より転載)。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 CREST「大型気象レーダー国際共同観測データと高解像度大気循環モデルの融合による大気階層構造の解明」(JPMJCR1663)、環境研究総合推進費 戦略的研究開発 SII-2、JST と独立行政法人国際協力機構 (JICA) の連携事業である地球規模課題対応国際科学技術プログラム (SATREPS、JPMJSA1901) の支援を受けて実施した。雲画像の分類は、SIGNATE 熱帯低気圧（台風等）検出アルゴリズム作成コンペティションの結果の一部である。本研究成果は、山形県庄内総合支庁から提供された海岸清潔度モニタリングデータを活用したものである。また、本研究を進めるにあたり有益な助言を賜った、特定非営利活動法人 (NPO) パートナーシップオフィス、加古真一郎氏、荒木文明氏、蒲地政文氏、石川洋一氏に感謝する。また、熱帯低気圧データの作成において中野満寿男氏、小玉知央氏、および山田洋平氏に感謝する。

文献

- [1] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E., "ImageNet classification with deep convolutional neural networks", Proceedings in Neural Information Processing Systems (NIPS), December 2012
- [2] Onishi, R., Sugiyama, D., "Deep Convolutional Neural Network for Cloud Coverage Estimation from Snapshot Camera Images", SOLA 13, 235-239, 2017
- [3] Matsuoka, D., Nakano, M., Sugiyama, D., Uchida, S., "Deep learning approach for detecting tropical cyclones and their precursors in the simulation by a cloud-resolving global

nonhydrostatic atmospheric model", *Prog. Earth Planet. Sci.* 5, 2018

[4] Nakano, M., Sugiyama, D., Hori, T., Kuwatani, T., Tsuboi, S., "Discrimination of seismic signals from earthquakes and tectonic tremor by applying a convolutional neural network to running spectral images", *Seismol. Res. Lett.* 90 (2A), 530-538, 2019

[5] Matsuoka, D., Watanabe, S., Sato, K., Kawazoe, S., Yu, W., Easterbrook, S., "Application of Deep Learning to Estimate Atmospheric Gravity Wave Parameters in Reanalysis Data Sets", *Geophys. Res. Lett.* 47(19), 2020

[6] Kako, S., Morita, S., Taneda, T., "Estimation of plastic marine debris volumes on beaches using unmanned aerial vehicles and image processing based on deep learning", *Mar. Pollut. Bull.* 155, 2020

[7] Martin, C., Zhang, Q., Zhai, D., Zhang, X., Duarte, C. M., "Enabling a large-scale assessment of litter along Saudi Arabian red sea shores by combining drones and machine learning", *Environ. Pollut.* 277, 2021

[8] Long, J., Shelhamer, E., Darrell, T., "Fully convolutional networks for semantic segmentation", *Proceedings in IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 3431-3440, 2015

[9] Sun, K., Zhao, Y., Jiang, B., Cheng, T., Xiao, B., Liu, D., Mu, Y., Wang, X., Liu, W., Wang, J., "High-resolution Representations for Labeling Pixels and Regions", *arXiv:1904.04514*, 2019

[10] Wang, J., Sun, K., Cheng, T., Jiang, B., Deng, C., Zhao, Y., Liu, D., Mu, Y., Tan, M., Wang, X., Liu, W., Xiao, B., "Deep high-resolution representation learning for visual recognition", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 43, 3349-3364, 2021

[11] Hidaka, M., Matsuoka, D., Sugiyama, D., Murakami, K., Kako, S., "Pixel-level image classification for detecting beach litter using a deep learning approach", *Marine Pollution Bulletin* 175, 2022

[12] Sugiyama, D., Hidaka, M., Matsuoka, D., Murakami, K., Kako, S., "The BeachLitter dataset for image segmentation of beach litter", *Data in Brief* 42, 2022

[13] Sugiyama, D., Hidaka, M., Matsuoka, D., Murakami, K., Kako, S., "The BeachLitter Dataset v2022", *SEANOE*, 2022

[14] Matsuoka, D., "Classification of imbalanced cloud image data using deep neural networks: performance improvement through a data science competition", *Progress in Earth and Planetary Science* 8(1), 2021

[15] Matsuoka, D., "Can machine learning models trained using atmospheric simulation data be applied to observation data?", *Experimental Results* 24, 2022

[16] Kodama, C., Yamada, Y., Noda, A. T., Kikuchi, K., Kajikawa, Y., Nasuno, T., Tomita, T., Yamaura, T., Takahashi, H. G., Hara, M., Kawatani, Y., Satoh, M., Sugi, M. "A 20-year climatology of a NICAM AMIP-type simulation", *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 93, 393-424, 2015

Development of Image Recognition Methods Using Deep Learning and Its Application to Geosciences

Project Representative

Daisuke Matsuoka

Information Engineering Program, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Daisuke Matsuoka *¹, Mitsuko Hidaka *¹, Daisuke Sugiyama *¹, Koshiro Murakami *¹

*¹Information Engineering Program, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Image recognition based on deep convolutional neural networks has demonstrated its effectiveness in extracting spatial patterns, and has recently been used in various earth sciences. The main results of this project in FY2021 are the development of semantic segmentation techniques for detecting and quantifying litters in coastal images. By projecting the detection results onto a composition taken from the sky, the area covered by litter was successfully estimated with high accuracy. Other achievements include the development of a classification method for the highly accurate detection of clouds that are precursors of tropical cyclones from atmospheric simulation data. In particular, we were able to obtain high classification accuracy by efficiently sampling the majority class and watering down the minority class when there is a 20-fold imbalance in the number of data.

Keywords : Deep convolutional neural network, image classification, semantic segmentation, beached litters, tropical cyclones

1. Introduction

Deep learning, a method of machine learning using multilayered neural networks, has been increasingly used in various fields of earth sciences in recent years. In particular, deep convolutional neural networks, which are specialized for image recognition, are excellent for detecting spatial patterns and have a high affinity in the study of oceans, weather, earthquakes, etc. The purpose of this project is to apply the latest technology in image recognition using deep learning to the earth sciences.

The four themes of this project are (1) object detection, regression, and class classification, (2) geophysical quantity transformation, (3) fusion of heterogeneous data, and (4) enhancement of resolution of low-resolution images. The results of FY2021 include the detection of beached litters from coastal images using semantic segmentation related to (1), and efficient classification of imbalance cloud image data in tropical cyclone detection related to (2).

2. Semantic segmentation for detecting beach litter

In this study, image analysis was performed on photographs of beaches taken by digital cameras to provide quantitative information on beached litter with excellent versatility and practicality (Hidaka et al. 2022 [1]). As an image analysis technique for photographs taken from the ground, we employed semantic segmentation, which classifies the input images into classes on a pixel-by-pixel basis. Eight classification classes were established: *beach*, *sea*, *sky*, *plant*, *installation*, and *background*, in addition to *artificial litter* such as plastic bottles, cans, and wood, and *natural litter* such as driftwood and seaweed. Here, in

order to learn the patterns (colors, patterns, shapes, etc.) specific to each class, a photograph of the beach and a pair of correct answer labels painted for each class in pixel units are required (Fig. 1). In this study, correct labels were created for 3500 coastal monitoring data provided by the Shonai Regional Government of Yamagata Prefecture. 2800 of the 3500 paired images were used as training data and 700 as evaluation data.

Accuracy using 700 data for evaluation showed that 30-70% of the pixels in the image that indicate artificial litter and 40-80% of the pixels that indicate naturally litter were detected correctly. If the two types of litter are combined into one class, including the case of mistaking wood (artificial litter) and driftwood (naturally litter), the detection accuracy is about 60%-90%.

The developed method can be used not only to count the number of pixels of litter in the image, but also to estimate the area covered by litter. In a case study conducted using the true value of the area of man-made litter detected visually from coastal images taken aerially by a drone, the area of coverage was successfully estimated with an error of about 10% even from ground photographs. In this method, it is necessary to perform projective transformation of the ground photo into a composition similar to that of the aerial photograph and also to make the size of the image correspond to the actual scale. To achieve this, information such as the angle of view of the camera when taking the picture and the distance to the bottom of the image are required. The training dataset for semantic segmentation used in this study is available (but only for academic use) through data repositories (Sugiyama et al. 2022 [2]; Sugiyama et al. 2022 [3]).

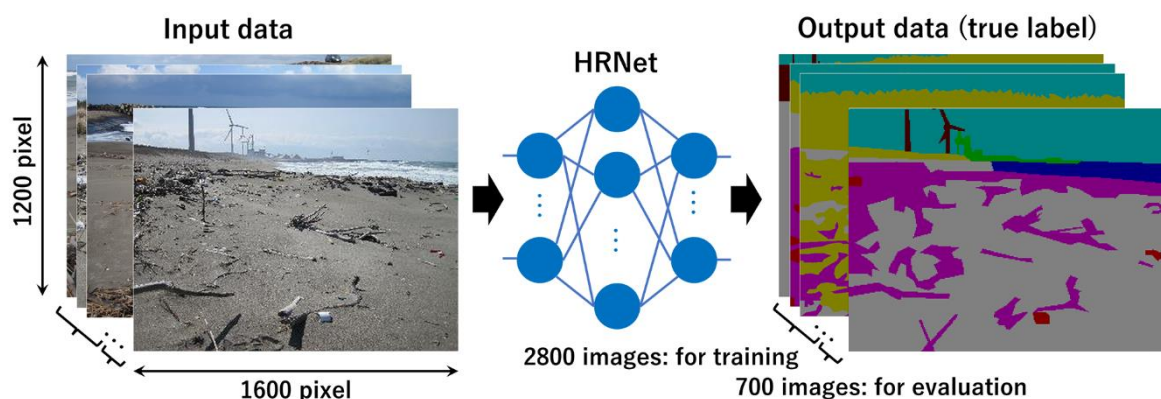


Figure 1. An overview of beached litter detection from coastal images using semantic segmentation (Hidaka et al. 2022 [11])

3. Classification of cloud image for detecting tropical cyclone

Image class classification is one of the most basic image recognition tasks, which is also utilized in the categorization of handwritten text, human faces, animals, and vehicles. For weather data, it is used to classify and predict the presence or absence of tropical cyclones such as typhoons, fronts, atmospheric rivers, etc. in the target area. On the other hand, the number of cases of such infrequent occurrences of so-called extreme weather events is extremely small, and the imbalance of data among each class contributes to the accuracy of classification predictions. In this study, we used the data for 2-class classification used in a previous study to develop a highly accurate class classification method for imbalance data (Matsuoka 2021 [4]; Matsuoka 2022 [5]).

The data used were 100,000 tropical cyclone images and 2 million other images. A machine learning model using a deep convolutional neural network was built to perform classification and prediction of unbalanced two-class images. The approaches used here are (1) data sampling, (2) ensemble learning, and (3) utilization of advanced deep learning methods. The most accurate model had Precision=0.66 when Recall=0.80, a 65.4% improvement over the results from the previous method (Matsuoka et al. 2018 [6]).

Acknowledgement

We thank to the Shonai General Branch Office in Yamagata Prefecture for providing monitoring records. We received valuable support from the Non-Profit Organization Partnership Office for communicating with the Yamagata Prefecture government office. Drs. S. Kako, F. Araki, M. Kamachi, and Y. Ishikawa provided us with an important understanding and support for this work. We also thank Drs. M. Nakano, C. Kodama, and Y. Yamada for producing the training and test data on tropical cyclones. This work was partly supported by JST, PRESTO (Grant Number JPM JPR1777), and JST, CREST (Grant Number JPMJCR1663).

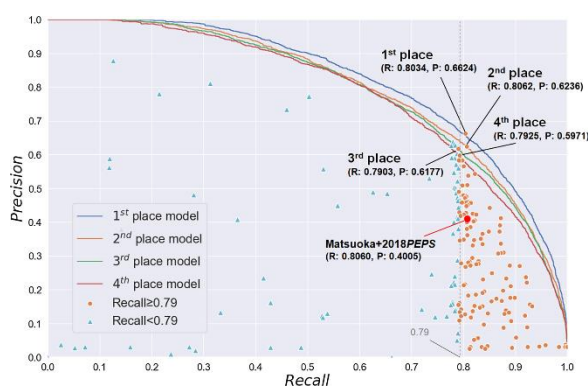


Figure 2. Classification performance for test data (Matsuoka, 2021 [15])

References

- [1] Hidaka, M., Matsuoka, D., Sugiyama, D., Murakami, K., Kako, S., "Pixel-level image classification for detecting beach litter using a deep learning approach", *Marine Pollution Bulletin* 175, 2022
- [2] Sugiyama, D., Hidaka, M., Matsuoka, D., Murakami, K., Kako, S., "The BeachLitter dataset for image segmentation of beach litter", *Data in Brief* 42, 2022
- [3] Sugiyama, D., Hidaka, M., Matsuoka, D., Murakami, K., Kako, S., "The BeachLitter Dataset v2022", SEANOE, 2022
- [4] Matsuoka, D., "Classification of imbalanced cloud image data using deep neural networks: performance improvement through a data science competition", *Progress in Earth and Planetary Science* 8(1), 2021
- [5] Matsuoka, D., "Can machine learning models trained using atmospheric simulation data be applied to observation data?", *Experimental Results* 24, 2022
- [6] Matsuoka, D., Nakano, M., Sugiyama, D., Uchida, S., "Deep learning approach for detecting tropical cyclones and their precursors in the simulation by a cloud-resolving global nonhydrostatic atmospheric model", *Prog. Earth Planet. Sci.* 5, 2018