

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	限られたデータを用いた機械学習の適用法とその有効性評価
氏 名 (Name)	中田 和真
GPU をはじめとする計算資源およびスマートフォンなどの IoT デバイスの普及により大量のデータを取得・分析する取り組みが加速している。特に深層学習を含む機械学習手法はより多くのデータを活用することで精度の良い予測を可能にする。一方で、ラベルが付与されたデータやテスト環境でのデータは収集コストが高いという課題がある。そこで、比較的収集コストが抑えられる、弱教師と呼ばれるあいまいなラベルや、ラベルなしデータを機械学習モデルの学習に活用することで、データ収集コストの抑制と信頼性の高い機械学習手法の実現が注目されている。 本研究では、医療画像とひび割れ画像を研究対象とし、限られたデータの中で重要なサンプルを推定することでデータの収集コスト抑制と高精度な予測の実現を通じて、限られたデータしか活用できない状況においても医療現場とインフラ設備外観検査の支援を目的とした。 「第 1 章 序論」では、これまでの機械学習について一般的な手法と実社会での活用についてまとめるとともに、手法だけでなく活用するデータの重要性について整理を行った。そのうえで、本研究の対象である医療分野とインフラ分野に対しての、本研究の貢献と提案を整理した。 「第 2 章 空間情報を用いた信頼性評価による肝硬変検出の高精度化」では、超音波画像を用いた肝硬変検出について、疾患部位のマスクが存在せず、画像単位でのラベルのみ与えられている弱教師あり学習の問題設定として扱う。小領域ごとのパッチ画像を周辺領域のパッチ画像と比較し信頼性評価を行うことで、画像内での疾患および健常な部位について選定を行い、機械学習モデルの学習およびテスト時の肝硬変検出の高精度化を検討した。 従来手法ではラスタスキャンにより自動生成されたパッチ画像をすべて使用しており、超音波ノイズや影・血管を含む肝硬変検出に不要な領域がモデルの学習とテスト時の分類に影響を与えていた。位置情報を用いた信頼性評価によって信頼できるパッチ画像に対象を絞ったモデルの学習とテスト時の分類を行うことが、人単位での肝硬変検出性能の向上に有効であると確認した。 「第 3 章 空間情報を用いた信頼性評価と Multiple Instance Learning の統合による CNN モデルの肝硬変検出の精度向上」では、第 2 章で有効性を確認した信頼性評価法を深層学習に適用し、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network, CNN) による画像特徴量抽出の自動化によって人の経験に依存しない特徴量と分類器の設計を検討した。 第 2 章において使用した Gabor 特徴と二次分類器はこれまでの経験から選択されている。一方で、そのような人手による疾患検出システムの設計では、検出精度が設計者に属人的になってしまう課題がある。また、CNN を用いた肝硬変検出では、画像特徴に基づく信頼性評価方法として Multiple Instance Learning (MIL) を活用した学習法が提案されていた。従来法では、医師の指導に基づいて手動で ROI を設定しており、設定された ROI の品質に肝硬変検出精度が依存するため、属人性が高い。本章では、自動設定された ROI に対して画像特徴抽出と分類器として CNN を使用し、MIL	

様式 7 号（第 12 条，第 31 条関係）
（様式 7 号）(Format No.7) 日本語版

フレームワークに REM の統合を行った。これにより，自動設定された ROI からでも人手に依存せず学習とテスト時の分類に有用な ROI の選択を可能とし，分類性能の向上を検討した。

「第 4 章 複数解像度画像における共変量シフト適応を用いたコンクリートひび割れ抽出の高精度化」では，コンクリート構造物の表面に発生するひび割れのセグメンテーションを対象とし，深層学習モデルの訓練とテスト時の環境で異なる解像度の画像を活用した場合でもひび割れ抽出の性能低下を抑制する手法を検討した。

ひび割れ抽出はインフラ構造物の外観検査自動化に活用され，トンネル，橋梁，といった面積の大きい領域を対象とする。現場での画像取得時にはドローン撮影により対象物とカメラの位置の距離が一定でない場合や，コスト削減のために低解像度のカメラしか使用できない場合が想定され，深層学習モデルの訓練とテスト時で解像度の変化によるひび割れ抽出性能の低下が課題となる。本研究では，訓練データ内のサンプルに対して，テスト時の環境に出現する確率の高いサンプルを重要サンプルとして自動で判別する重要度重みづけモデルを学習した。実験では，重要サンプルに対して大きい重みを付与することで，ひび割れ抽出モデルの学習をテスト時の環境に適応できたことを確認した。

「第 5 章 結論」では，第 2 章から第 4 章までで得られた検討結果の総括と今後の課題について述べた。

第 2 章，第 3 章での本研究の成果は，人単位でのラベルのみ与えられた弱教師あり学習により，疾患領域のラベル付けコスト抑制と高精度な疾患の検出を実現する手法を開発したことである。特に分割画像に対する位置情報の活用で信頼できる領域の選択を行い従来の弱教師あり学習から精度を向上させた。

第 4 章での本研究の成果は，共変量シフト適応により，ひび割れ抽出での複数解像度によるドメイン適応を実現したことである。特にテスト時の環境で得られる画像が低解像度であるとき，訓練データの重要サンプルに対して自動での重みづけを可能とし，重みづけしない場合と比較してひび割れ抽出性能を向上させた。

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Development and Evaluation of Machine Learning Applications under Limited Data Conditions
氏 名 (Name)	NAKATA Kazuma
The rapid proliferation of computational resources such as GPUs, together with the widespread adoption of IoT devices including smartphones, has significantly accelerated efforts to acquire and analyze large volumes of data. In particular, machine learning techniques—especially those based on deep learning—can achieve highly accurate predictions by leveraging large-scale datasets. However, collecting labeled data and data obtained under controlled test environments is often costly and labor-intensive. To address this challenge, increasing attention has been paid to learning frameworks that exploit weak supervision, such as ambiguous or noisy labels, as well as unlabeled data, which can be acquired at relatively low cost. By utilizing such data for model training, it becomes possible to reduce data collection costs while maintaining reliable machine learning performance. This study investigates medical images and crack images, with the objective of supporting medical practice and visual inspection of infrastructure facilities under data-scarce conditions. By identifying informative samples from limited datasets, we aim to reduce data collection costs while maintaining high prediction accuracy. Chapter 1, <i>Introduction</i>, provides an overview of general machine learning methodologies and their applications in real-world settings. In addition to summarizing representative techniques, this chapter emphasizes the critical importance of data itself, rather than algorithms alone, in determining system performance. Based on this discussion, the chapter clarifies the contributions and proposals of this research with respect to the medical domain and infrastructure inspection. Chapter 2, <i>Improving the Accuracy of Cirrhosis Detection via Reliability Evaluation Using Spatial Information</i>, addresses the problem of cirrhosis detection from ultrasound images under a weakly supervised learning setting. In this scenario, no pixel-level or region-level annotations of disease areas are available, and only image-level labels are provided. To address this challenge, the proposed method evaluates the reliability of local patch images by comparing each patch with its surrounding region. Through this reliability evaluation, disease-related and healthy regions within an image are selectively identified, and only reliable patches are used during model training and testing. This approach enables more accurate cirrhosis detection. Conventional methods rely on all patch images automatically generated by raster scanning, which often include regions irrelevant to cirrhosis detection, such as ultrasound noise, acoustic shadows, and blood vessels. These irrelevant regions can negatively affect both model training and classification performance. Experimental results demonstrate that applying reliability evaluation based on spatial information to restrict learning and	

classification to reliable patch images is effective in improving subject-level cirrhosis detection performance.

Chapter 3, *Enhancing CNN-Based Cirrhosis Detection by Integrating Spatial Reliability Evaluation and Multiple Instance Learning*, extends the reliability evaluation method validated in Chapter 2 by applying it to deep learning. In this chapter, convolutional neural networks (CNNs) are employed to automate image feature extraction, enabling the design of feature representations and classifiers that do not depend on human expertise.

In Chapter 2, Gabor features and a secondary classifier were selected based on prior experience. However, such manually designed systems suffer from subjectivity, as detection performance can strongly depend on the designer's expertise. In contrast, CNN-based cirrhosis detection methods have been proposed that employ Multiple Instance Learning (MIL) as a framework for reliability evaluation based on image features. In conventional MIL-based approaches, regions of interest (ROIs) are manually defined according to medical expertise, resulting in high dependency on the quality of the selected ROIs.

To overcome these limitations, this chapter integrates the proposed Reliability Evaluation Method (REM) into the MIL framework while using CNNs for both feature extraction and classification. The method operates on automatically generated ROIs, enabling the selection of reliable ROIs for training and testing without human intervention. Experimental results confirm that this integration improves classification performance and reduces dependence on manually defined ROIs.

Chapter 4, *Improving Concrete Crack Segmentation via Covariate Shift Adaptation for Multi-Resolution Images*, focuses on the segmentation of cracks on concrete surfaces. This task is essential for automating visual inspections of large-scale infrastructure such as tunnels and bridges. In practical environments, images are often captured under varying conditions, for example using drones, where the distance between the camera and the target object is not constant. Additionally, cost constraints may require the use of low-resolution cameras. These factors cause discrepancies in image resolution between training and testing data, leading to degraded performance of deep learning models.

To address this issue, the proposed method applies covariate shift adaptation by learning an importance-weighting model that automatically identifies samples in the training dataset that are more likely to appear under test-time conditions. By assigning higher weights to such important samples during training, the crack segmentation model can better adapt to the test environment. Experimental results demonstrate that this approach effectively mitigates performance degradation caused by resolution differences and improves crack extraction accuracy compared to models trained without importance weighting.

Finally, Chapter 5, *Conclusion*, summarizes the findings from Chapters 2 through 4 and discusses future research directions. The key contributions of Chapters 2 and 3 include the development of methods that reduce labeling costs while achieving high-accuracy disease detection under weakly supervised learning settings, where only subject-level labels are available. In particular, leveraging spatial information to select reliable regions

様式 7 号 (第 12 条, 第 31 条関係)

(様式 7 号) (Format No.7) 英語版

significantly improves detection performance over conventional weakly supervised approaches. The primary contribution of Chapter 4 is the realization of domain adaptation across multiple image resolutions through covariate shift adaptation. By automatically weighting important training samples when test-time images are low resolution, the proposed method achieves superior crack extraction performance compared to unweighted training approaches.

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)
(about 800 words)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	中田 和真
審 査 委 員	主 査：藤田 悠介
	副 査：多田村 克己
	副 査：田村 慶信
	副 査：中村 秀明
	副 査：間普 真吾
論 文 題 目	限られたデータを用いた機械学習の適用法とその有効性評価 (Development and Evaluation of Machine Learning Applications under Limited Data Conditions)
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 近年、計算資源の高度化や IoT デバイスの普及に伴い、機械学習は多様な分野で活用されている。一方で、実環境における機械学習モデルの構築および運用においては、利用可能なデータの量や質が限られるという本質的な問題が存在する。特に、必要なラベル情報が十分に付与されていない場合や、学習環境と運用環境の間でデータの質や性質に差異が生じる場合には、モデル性能の低下が避けられない課題となる。 本学位論文では、データの選択および重み付けという観点に基づき、限られたデータ条件下においても安定した性能を有するモデルを構築可能な機械学習手法の確立を目的とした。医療画像およびインフラ点検画像を対象とし、モデル性能の向上と安定化を実現するための手法を提案し、その有効性を検証した。本論文では大きく三つの課題を設定している。① 画像データの空間上の関係を考慮した信頼性評価をいかに設計するか、② 限られた教師情報を用いた深層学習モデルの構築において有効なデータ選択をいかに実現するか、③ 学習環境と異なる条件下でのデータ分布変動にいかに適応するか、である。 ①に対しては、超音波画像を用いた肝硬変識別の問題を対象として、画像空間上の位置関係に基づく信頼性評価を導入し、従来の画像特徴量に基づく信頼性評価と統合することで、患者単位の検出精度を向上させる手法を提案した。②に対しては、同問題を対象として深層学習モデルを用いた弱教師あり学習の枠組みに本信頼性評価法を適用し、ROI (Region of Interest) を手動設定することなく有効な学習領域を自動的に選択し、推論時においても識別に寄与する ROI を適切に選択する方法を提案した。③に対しては、インフラ構造物のひび割れ抽出問題を対象に、共変量シフト適応に基づく重要度重み付けを導入し、学習データと推論データ間の解像度差に起因する性能低下を抑制する方法を提案し、その有効性を明らかにした。 本学位論文は、全 5 章から構成されている。第 1 章では、研究の背景、目的、および論文の構成について述べている。第 2 章では、超音波画像を用いた肝硬変識別問題に対して、従来の画像特徴量にもとづく訓練サンプル選択法である Multiple Instance Learning お	

(様式 9 号)

よび Self-Training を用いた方法, ならびに複数の ROI を用いた Product rule による識別法について述べ, 本論文で提案する画像空間上の位置関係に基づく信頼性評価法について説明し, その有効性について述べている。第 3 章では, 同問題に対する深層学習モデルへの適用について述べている。従来の弱教師あり学習法である Multiple Instance Learning の枠組みに提案手法を統合し, 限られたデータ条件下における深層学習モデルの学習時と推論時のサンプル選択の有効性について検証し, 適用可能性について議論している。第 4 章では, インフラ構造物のひび割れ抽出問題を対象に, 共変量シフト適応に基づく重要度重み付けを導入し, 学習データと推論データ間の解像度差に起因する性能低下を抑制する方法を提案し, その有効性と他の問題への適用について述べている。第 5 章では, 本研究の成果を総括し, 結論を述べている。

公聴会には 20 名の参加があり, 活発な議論が行われた。主な質疑内容は, 提案手法におけるデータ制約(特徴量およびラベルの制限)の解釈, 異分野への適用可能性, 検出性能および評価指標に関する考え方, 医療応用における見落としリスクへの対応や実運用の可能性に関するものなどであった。いずれの質問に対しても申請者からの的確な回答がなされた。

以上より, 本研究は独創性, 信頼性, 有効性, 実用性ともに優れ, 博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会, 公聴会での質問に対する応答などから, 最終試験は合格とした。

なお, 主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。(関連論文計 3 件)

1. Kazuma Nakata, Yusuke Fujita, Yoshihiro Mitani, Yoshihiko Hamamoto, Makoto Segawa, Shuji Terai, Isao Sakaida, Automatic ROI Selection with a Reliability Evaluation Method for Cirrhosis Detection Using Ultrasound Images, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.19, No.7, pp.1234-1244, 2024 年 3 月発行
2. Kazuma Nakata, Yusuke Fujita, Yoshihiro Mitani, Yoshihiko Hamamoto, Makoto Segawa, Shuji Terai, ROI Selection to Improve Prediction Performance of CNN for Cirrhosis Detection Using Ultrasound Images, 2024 IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp.636-640, 2024 年 10 月発行
3. Kazuma Nakata, Yusuke Fujita, Crack Segmentation with Covariate Shift Adaptation for Multi-Resolution Images, The 10th International Conference on Intelligent Informatics and BioMedical Sciences, pp. 458-463, 2025 年 12 月発行