

論文内容要旨（和文）

2022年度入学 大学院博士後期課程

電子情報工学 専攻

氏 名 三村 祐輝 印

論文題目 超音波画像への深層学習の効果と応用に関する研究

超音波検査は、音波の透過又は反射を利用して物体内部の状態を可視化することが出来る非破壊検査技術である。透過法は、物体内部を透過してきた音波の吸収や音速を計測する方法である。一方、反射法は送信した超音波が音響インピーダンスの異なる物質同士の界面で反射してきた音波を受信する方法である。これらの方法は、木材やコンクリートなどの損傷状態の確認や、放射線被曝のリスクがない点から生体内の診断に活用されている。しかし、どちらの方法で撮像された超音波画像も物体の形状が崩れたり、アーチファクトにより画像が不鮮明なケースがある。これは、受信データに含まれるノイズ、測定点の不足、超音波の波長が長いなど測定時の条件が原因となることが多い。これまでは、受信波形にノイズフィルタを掛ける等の対策を実施してきたが、信号処理のみで問題を解決することは難しい。

本論文では、透過法及び反射法の両方の超音波検査に深層学習を応用した場合の効果とその有効性を、いくつかの具体例を通じて検討する。本論文は、次の6章で構成される。

第1章 序論

序論として研究背景と目的について述べる。研究背景では、超音波画像が利用されている主要な分野について説明し、従来の技術における問題点を示す。また、これまでに私が行ったL1ノルム最小化を用いた信号処理による実験についても説明する。

第2章 超音波検査と深層学習の技術

第2章では、超音波計測及び信号処理を用いた画像再構成法の原理について説明する。さらに、深層学習の基本技術及び本論文で使用する畳み込みニューラルネットワーク(CNN: Convolutional Neural Networks)と敵対的生成ネットワークについて詳述する。

第3章 超音波音速CTとCNNを用いた超音波伝搬時間の推定

透過法に深層学習を応用した具体例として、超音波音速CTシステムから取得した多数の計測波形に2次元CNNを利用して、超音波伝搬時間(TOF: Time-of-Flight)を推定する方法と結果を述べる。まず、MATLABのk-Wave Tool Boxを用いた超音波伝搬シミュレーションで波形データを作成し、シミュレーションデータから2次元CNNモデルでTOF推定が可能であるか実験した。次に、超音波伝搬シミュレーション及び水中実測実験で取得した波形データを用いて、2次元CNNモデルでTOF推定を行った。この実験では、2次元CNNモデルに対してシミュレーションデータを用いて事前学習を行った後に、水中実測実験の実測データでファインチューニングを行った。2次元CNNモデルのTOF推定結果は、従来の信号処理を用いたTOF推定の結果と比較した。また、2次元CNNモデルと従来の信号処理法で推定したTOFを用いて再構成画像を作成し、定量評価指標であるPSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)とSSIM(Structural Similarity Index)で画像評価を行った。

第4章 pix2pixを用いた超音波画像のX線CT画像変換

反射法に深層学習を応用した具体例として、pix2pixを用いて医療用超音波画像をX線CT類似の画像に変換する方法について述べる。まず、DICOM(Digital Imaging and Communications in Medicine)規格の生体内を撮像したX線CT画像

のCT値を基に、多数の散乱体に反射率を定義した数値ファントムを作成した。この数値ファントムとMATLABの音響伝搬シミュレーションField IIを用いて超音波伝搬シミュレーションを実施し、X線CT画像と同じ部位を撮像した超音波画像を作成した。シミュレーションで作成した超音波画像を入力データ、X線CT画像を教師データとしてpix2pixで学習を行い、超音波画像をX線CT類似の画像に変換した。また、pix2pixの層構造にTransformerを組み込んだTranspix2pixを作成し、pix2pixの生成画像と比較を行った。pix2pixとTranspix2pixの生成画像は、第3章と同様にPSNRとSSIMを用いて画像評価を行った。

第5章 考察

第5章では、第3、4章で得られた結果を基に、深層学習を用いた方法が従来法と比較してどのように優れているか考察を述べる。


第6章 結論

第6章では、本論文の結論と今後の課題について述べる。提案手法の有効性を再確認し、さらに今後の研究の方向性についても示す。

論文内容要旨 (英文)

2022年度入学 大学院博士後期課程

電子情報工学 専攻

氏 名 三村 祐輝 

論文題目 A Study on the Effectiveness and Applications of Deep Learning in Ultrasonic Imaging

Ultrasonic testing is a non-destructive testing technology that visualizes the internal state of objects using the transmission or reflection of sound waves. The transmission method measures the absorption and speed of sound waves that have passed through the object, while the reflection method receives sound waves reflected at the interface between materials with different acoustic impedances. These methods are utilized for inspecting the damage states of materials such as wood and concrete, as well as for medical diagnosis due to the absence of radiation exposure risks. However, ultrasonic images produced by either method sometimes exhibit shape distortions or artifacts, resulting in unclear images. This is often caused by factors such as noise in the received data, insufficient measurement points, or the long wavelength of ultrasonic. Although noise filters have been applied to the received waveforms, it is difficult to solve these problems using signal processing alone.

In this paper, the effects and effectiveness of applying deep learning to both transmission and reflection methods in ultrasonic testing are examined through several specific examples. This paper is structured into six chapters.

Chapter 1: Introduction

The introduction describes the research background and objectives. The background section explains the major fields where ultrasonic imaging is utilized and highlights issues in conventional techniques. Additionally, experiments I conducted using signal processing based on L1 norm minimization are also explained.

Chapter 2: Ultrasonic testing and deep learning techniques

This chapter explains the principles of image reconstruction using ultrasonic measurement and signal processing. Furthermore, it details the basic techniques of deep learning, particularly convolutional neural networks (CNNs) and generative adversarial networks (GANs) used in this paper.

Chapter 3: Estimation of ultrasonic propagation time using ultrasonic CT and CNN

As an example of applying deep learning to the transmission method, this chapter describes a method for estimating the ultrasonic propagation time (TOF: Time-of-Flight) using 2D CNN from numerous waveforms obtained by an ultrasonic CT system. First, waveform data were generated using ultrasonic propagation simulations with MATLAB's k-Wave Toolbox, and experiments were conducted to verify the feasibility of TOF estimation using a 2D CNN model. Then, TOF estimation was performed using waveform data obtained through ultrasonic propagation simulations and underwater measurements. The 2D CNN model was pre-trained with simulation data and fine-tuned with underwater experimental data. The TOF estimation results of the 2D CNN model were compared with conventional signal processing methods. Reconstructed images were generated using the TOF values estimated

ated by the 2D CNN and conventional methods, and the images were evaluated using quantitative metrics such as PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) and SSIM (Structural Similarity Index).

Chapter 4: Conversion of ultrasonic images to X-ray CT images using pix2pix

As an example of applying deep learning to the reflection method, this chapter describes a method for converting medical ultrasonic images to X-ray CT-like images using pix2pix. A numerical phantom was created by defining the reflectivity of scatterers based on the brightness values of X-ray CT images captured in the DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) format. Ultrasonic propagation simulations were performed using this numerical phantom and MATLAB's Field II simulation tool to generate ultrasonic images corresponding to the same regions as the X-ray CT images. The ultrasonic images generated through simulation were used as input data, and the X-ray CT images as ground truth to train pix2pix for converting ultrasonic images into X-ray CT-like images. Additionally, a Transpix2pix model incorporating a Transformer into the pix2pix architecture was developed, and its output images were compared with those generated by pix2pix. The images produced by pix2pix and Transpix2pix were evaluated using PSNR and SSIM, similar to Chapter 3.

Chapter 5: Discussion

This chapter discusses the advantages of deep learning-based methods over conventional methods, based on the results obtained in Chapters 3 and 4.

Chapter 6: Conclusion

This chapter summarizes the conclusions of the paper and outlines future challenges. The effectiveness of the proposed methods is reaffirmed, and future research directions are presented.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和 7 年 2 月 8 日

理 工 学 研 究 科 長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 柳田 裕隆 印

副査 深見 忠典 印

副査 杉本 俊之 印

副査 小坂 哲夫 印

学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論 文 申 請 者	専攻 電子情報工学専攻	氏名 三村 祐輝
論 文 題 目	超音波画像への深層学習の効果と応用に関する研究	
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日 令和 7 年 1 月 21 日～ 令和 7 年 2 月 7 日
論文公聴会	令和 7 年 2 月 7 日	場 所 工学部 7 号館 302 教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日 令和 7 年 2 月 7 日
学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)		
<p>本論文では、透過法及び反射法の両方の超音波検査に深層学習を応用した場合の効果と有効性を検討し、評価している。透過法では、超音波音速 CT のシミュレーションと水中実測実験による波形データから畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Networks) による超音波伝搬時間 (TOF: Time-of-Flight) の推定方法を提案した。反射法では、X 線 CT 画像を基に散乱体の反射率を定義した数値ファントムを作成し、超音波伝搬シミュレーションで取得した生体内の超音波画像を pix2pix と Transpix2pix を用いて X 線 CT 類似の画像に変換する方法を提案した。</p> <p>本論文の新規性・独自性は、透過法と反射法の超音波検査に対して CNN 及び pix2pix・Transpix2pix を応用し、従来の信号処理では対策が困難である問題の解決策を提案している点である。本論文は、第 1 章にて研究背景・目的が十分に述べられており、超音波検査の問題点が指摘されている。第 2 章では、超音波検査と深層学習の基礎技術が論理的に詳述されている。第 3 章では、透過法に CNN を応用した場合の実験方法と結果が述べられている。第 4 章では、反射法に pix2pix・Transpix2pix を応用した場合の実験方法と結果が述べられている。第 5 章では、第 3 章と第 4 章の実験結果に対する考察が十分に詳述されている。第 6 章では、研究目的に対する結論が明確に述べられており、今後の課題が記されている。本論文は構成が適切で体裁が整っており、専門知識を基にした記述が論理的で、研究テーマに沿った明確な結論が述べられていた。</p> <p>また、本研究成果は学術論文を筆頭著者として和文 1 報と英文 1 報の計 2 報と、国際学会において 4 度の発表を行っている。国内学会・研究会においても多数の発表を行なっているため、工学的貢献が十分に認められる。以上より、本学位論文は学位論文審査基準を満たしているため、合格と判定した。</p>		
研究内容に関する研究倫理又は利益相反に係る手続き		
<p>研究内容に関する研究倫理又は利益相反に係る手続きについて確認します。手続きの有無について該当する項目の□にチェックの上、手続きを要した場合は、手続きの内容を記入してください。</p> <p>□ 本論文は、研究倫理又は利益相反に係る手続きを要する研究内容を含んでいます。</p> <p>内容：</p> <p>☑ 本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。</p>		
最終試験の結果の要旨		
<p>博士学位論文公聴会における発表の様子とその後に行われた質疑応答を通して、専門知識、問題分析力、関連知識、論理構成力について博士(工学)に値する十分な知識と能力があると認められる。また、筆頭著者として和文 1 報と英文 1 報の計 2 報の学術論文を執筆していること、複数回の国際会議において口頭発表していることから、博士(工学)に求められる能力が十分に備わっていると認められるので、合格と判定した。</p>		