

深層学習を用いた散乱体形状の逆解析

Inverse analysis of scatterer geometry using deep learning

斎藤 隆泰¹⁾川上 真穂²⁾

Takahiro SAITOH, Makoto KAWAKAMI

¹⁾群馬大学 大学院理工学府 准教授 (〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1, E-mail:t-saitoh@gunma-u.ac.jp)

²⁾群馬大学 大学院理工学府 環境創生教育プログラム 修士課程 (〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1, E-mail:t190c033@gunma-u.ac.jp)

Inverse problems for scatterers using waves are used in various engineering fields, such as non-destructive inspection and geophysical exploration. On the other hand, in recent years, the machine learning and deep learning have attracted attention in order to create artificial intelligence (AI). In the case of a two-dimensional problem, it is known that the shape of a general object can be expressed in the form of Fourier series expansion. Therefore, in this research, we try to develop a defect geometry reconstruction method using the deep learning that predicts the coefficients of the Fourier series expansion for a defect geometry. As numerical examples, the effectiveness of the proposed method is confirmed by estimating the shape of scatterer in 2-D infinite space.

Key Words : Inverse problem, deep learning, boundary element method, scattering

1. はじめに

波動を用いた逆解析は古くから行われてきた。開発された種々の逆解析手法は、地震学や非破壊評価の分野等で利用されている。例えば、開口合成法は、散乱源を推定するために最も容易かつ実用的な方法の一つとして知られている。比較的最近では、Bonnet ら [1] によるトポロジー感度を用いた散乱源推定法も提案されている。これらの方法は、観測された散乱波を用いて物体のおよその位置を推定するものである。一方、散乱体のおよその位置のみならず、形状を逆解析する試みもいくつか報告されている。例えば、三澤ら [2] は、二次元電磁波動問題を対象としたパラメトリック形状最適化手法を提案している。一方、近年、機械学習や深層学習といった人工知能 (AI) 作成の基礎技術の工学への応用が盛んに行われている。特に、深層学習は、近年の計算機ハードウェアの発達に伴い、大規模なデータから機械が特徴量を自動的に抽出することが可能である。深層学習を逆解析に用いた例は、いくつか報告されており、著者らも 2 次元スカラー波動問題等に対していくつか成果を報告 [3] しているが、散乱体の形状推定までは逆解析できておらず、およその散乱体の大きさを推定するに留まっている。

そこで本研究では、深層学習を用いて散乱体の形状自体を推定することを試みる。以下では、対象とする波動を 2 次元面外波動 (スカラー波動問題) とする。また、逆解析を実施するために必要な波動のデータは、演算子積分時間領域境界要素法により作成したデータを用いることとする。まず、本研究で扱う問題の設定や、基礎方程式について述べた後、逆解析に用いる深層学習の概要について簡単に説明する。その後、2 次元無限弾性体中の任意形状の散乱体に対する逆解析用の AI を小規模なデータセットに対して作成し、得られた AI を用いて未学習の散乱体形状を逆解析した結果を示す。数値解析例

より、簡単な形状に対しては、小規模なデータセットでも散乱体形状を逆解析できることを示す。最後に、今後の課題等について述べる。

2. 問題設定と基礎式

図 1 に示すような逆解析モデルを考える。2 次元無限弾性体 Ω 中に境界 S を持つ散乱体が唯一存在すると仮定する。入射波は x_1 軸の正方向に伝搬する平面波とし、散乱体により生じる散乱波を複数の観測点 (receiver points) で受信する。最初に、この散乱問題を、演算子積分時間領域境界要素法で解き、観測点での波形を模擬する。等方均質な面外波動問題における面外方向変位 $u(\mathbf{x}, t)$ は次の方程式を満足する。

$$\Delta u(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{c^2} \ddot{u}(\mathbf{x}, t) \quad (\mathbf{x} \in \Omega, 0 < t) \quad (1)$$

$$q(\mathbf{x}, t) = \mu \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (\mathbf{x} \in S, 0 < t) \quad (2)$$

$$u(\mathbf{x}, 0) = \dot{u}(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad (\mathbf{x} \in \Omega) \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{n} は散乱体表面 S の外向き単位法線ベクトル、 t は時間、 μ はせん断弾性定数、 c は波速、 (\cdot) は時間微分、 q は表面力を表す。さて、解析の対象とする散乱体を、三澤ら [2] に倣い、Fourier 級数を用いて次のように表わされると仮定する。

$$x(\theta) = \sum_{i=0}^{N_F} a_i \cos i\theta, y(\theta) = \sum_{i=0}^{N_F} b_i \sin i\theta \quad (4)$$

ここで、 N_F は Fourier 級数の最大次数である。よって、散乱体の境界 S の形状を求めるには、式 (4) より、

$$\mathbf{p} = (a_0, \dots, a_{N_F}, b_1, \dots, b_{N_F}) \quad (5)$$

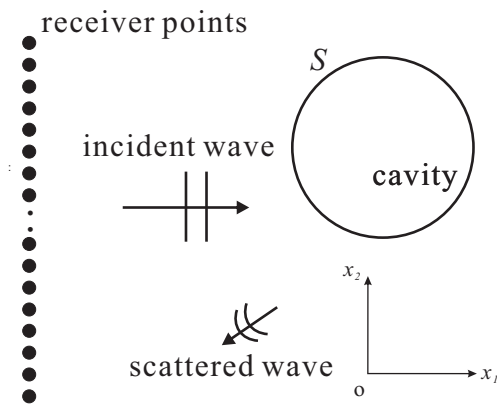


図-1 逆解析モデル。

を決定できればよい。以下では、式 (5) を適当に与えた場合の散乱問題を演算子積分時間領域境界要素法で解くことで、観測点での模擬散乱波形を作成する。

3. 深層学習

本研究では、散乱体の形状を逆解析するために、深層学習を利用する。まず、式 (5) のパラメータを適当に与え、式 (4) を用いて散乱体形状を作成する。ただし、簡単のため、散乱体は空洞と仮定した。次に、この散乱体に対して、演算子積分時間領域境界要素法を用いた散乱問題を解析し、受信点での波形を模擬する。ただし、深層学習が画像解析との相性が良いことを考慮し、受信点での模擬波形を 1 列に並べ、画像化する。これらの手順を多数回繰り返し、式 (5) のパラメータと画像化された受信波形データの組み合わせを多数用意する。これらの組み合わせデータを深層学習のための学習データとする。深層学習では、これら組み合わせデータを入力として与え、出力には線形関数を用いて式 (5) のパラメータの予測値を出力させる。式 (5) を式 (4) に与え、散乱体の形状を再構成し、予測結果が正しいか検討する。

ただし、深層学習の詳細については、今日では様々な文献を参照することができる。そのため、本稿ではその詳細は割愛する。

4. 逆解析結果

逆解析結果を示す。図 2, 図 3 は、それぞれ式 (4) で $N_F = 1, a(0) = a(1) = b(0) = b(1) = 0.55$ の場合、 $N_F = 1, a(0) = 0.55, a(1) = 0.75, b(0) = 0.75, b(1) = 0.55$ の場合の散乱体形状を逆解析した結果を示している。ただし、ここで用いたデータセットの組は 625 個であり、深層学習としては比較的小規模なものである。参考のため、真の形状を赤線で示してある。いずれの場合においても、CNN による逆解析結果は、真の形状と完全に一致するとはいわないまでも、およそ一致していることがわかる。図 2 の場合は縦長、図 3 の場合は横長の散乱体を再構成できていることがわかる。

5. おわりに

本研究では、2 次元面外波動問題を対象に散乱体の形状を逆解析することを行った。散乱体が空洞の場合、比較的小規模なデータセットでも散乱体の形状を逆解析することができた。今後は、式 (5) のパラメータを増や

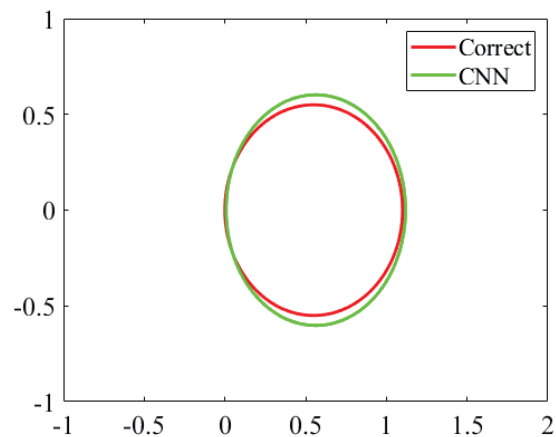


図-2 $N_F = 1, a(0) = a(1) = b(0) = b(1) = 0.55$ の散乱体に対する逆解析結果。

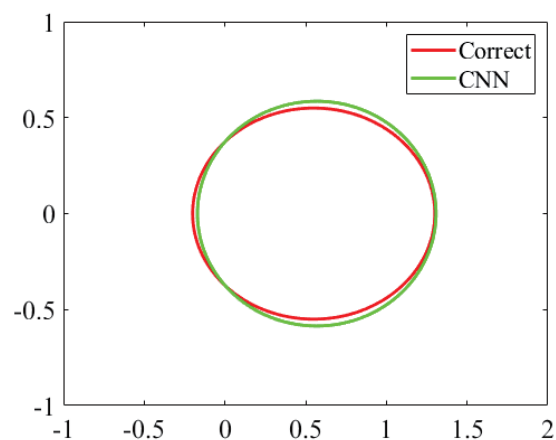


図-3 $N_F = 1, a(0) = 0.55, a(1) = 0.75, b(0) = 0.75, b(1) = 0.55$ の散乱体に対する逆解析結果。

し、より複雑な形状に対する逆解析や、弾性波動問題への拡張を行う予定である。また、一般的に逆解析が難しい、異方性弾性波動問題への拡張も視野に入れている。

謝辞

本研究の成果の一部は、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (jh220033), 並びにセコム科学技術振興財団による支援を得て行われました。

参考文献

- [1] Bonnet, M.: Topological sensitivity for 3D elastodynamic and acoustic inverse scattering in the time domain, *Comput. method appl. m.*, Vol.195, pp.5239-5254, 2006.
- [2] 三澤亮太, 高橋二郎, 馬哲旺, 大平昌敬: 二次元電磁波動散乱問題の複素固有値を対象とする Nyström 境界積分方程式法を用いたパラメトリック形状最適化, 計算数理工学論文集, **21**, pp.71-79, 2021.
- [3] 斎藤隆泰, 笹岡真次, 廣瀬壮一: 固体中の欠陥位置および大きさ推定のための深層学習ベース 2 次元逆散乱解析, AI・データサイエンス論文集, vol.3, pp.935-944, 2022.