

PINN によるリアルタイム構造振動解析と AR での可視化

筑波大学 学生会員 ○奥田 東子
筑波大学 正会員 西尾 真由子

1. はじめに

近年, 様々な工学分野においてリアルタイムでインタラクティブなシミュレーションと, その結果の拡張現実(AR)や仮想現実(VR)による可視化の需要が高まってきた。このような技術はインフラ構造物運用においても有用で, シミュレーション結果を可視化することで構造物の挙動の感覚的な理解を促し, 構造物の設計, 維持, 管理を効率化させる。しかし, 有限要素モデルによる動的解析など構造物シミュレーションは計算コストが高く, その応用は限定的である。そこで本研究では, 構造物の振動解析手法として Physics-informed neural networks(PINN)の適用を検討し, 基礎検討として片持ち梁の非減衰自由振動を対象に PINN によるリアルタイム振動解析とその結果の AR による可視化に取り組んだ。リアルタイム解析と AR による可視化のフレームワークにおいて, 計算コスト, 精度の観点から PINN のリアルタイムシミュレーションの解析手法としての適用性を明らかにする。

2. Physics-informed neural networks (PINN) 概要

PINN は 2017 年に Raissi ら¹⁾によって提案された, 損失関数に解析対象の物理法則を組み込んだニューラルネットワーク(NN)である。対象とした片持ち梁振動問題の設定を図 1 に示す。長さ $l=1\text{m}$ の梁で自由端部に初期変位 0.05m を与えるときの振動を考えるが, ここでは初期検討として減衰を考えない式(1)の運動方程式を扱うこととした。振動運動中に片持ち梁に生じる変位と曲げモーメントを PINN により求める。式(1)におい

て E は梁のヤング率, I は断面二次モーメント, ρ は密度, A は断面積, l は梁の長さを表す。境界条件は式(2), 初期条件は微分方程式の解である式(3)とした。 λ は無次元定数でこの問題においては $\lambda = 1.875$ である。また, 観測データは $x = 0.2, 0.5, 0.8\text{ m}$ で変位データを取得することを想定し, 変位の理論解に $\sigma = \pm 80\mu\text{m}$ のノイズを付与してデータ値とした。図 2 に PINN の構造を示す。まず NN で, 時間と梁での位置 (t, x) の入力に対する変位 u と変位の二階微分を出力すると, 各出力に対して自動微分を行う。そして, 解空間内を実験計画法でサンプリングしたコロケーションポイント (t_{PDE}, x_{PDE}) の $f(t, x)$ 代入値の二乗ノルム項 $Loss_{PDE}$, 境界条件が付与される点 (t_{BC}, x_{BC}) での二乗ノルム項 $Loss_{BC}$, 観測データに対する残差項 $Loss_{ob}$ で構成する損失関数を最小とする NN パラメータを求める。本研究では, コロケーションポイント 10000 点, 初期条件点 1000 点, 境界条件点は 4000 点, 観測データ点は 3000 点とした。NN の学習や予測には Python ライブラリの Tensorflow を用いて, 5 層 20 ニューロンのネットワーク構成とし, 最適化法は L-BFGS-B として, NN のパラメータを推定した。

$$f(t, x) = EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

$$u(t, 0) = 0, \quad \frac{\partial u(t, 0)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial^2 u(t, l)}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 u(t, l)}{\partial x^3} = 0 \tag{2}$$

$$u(0, x) = 0.025 \left\{ \cos \frac{\lambda x}{l} - \cosh \frac{\lambda x}{l} - \frac{\cos \lambda + \cosh \lambda}{\sin \lambda + \sinh \lambda} \left(\sin \frac{\lambda x}{l} - \sinh \frac{\lambda x}{l} \right) \right\} \tag{3}$$

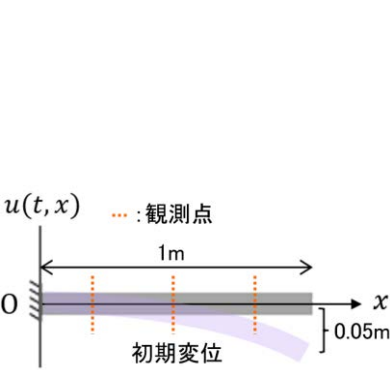


図-1 片持ち梁振動の問題設定

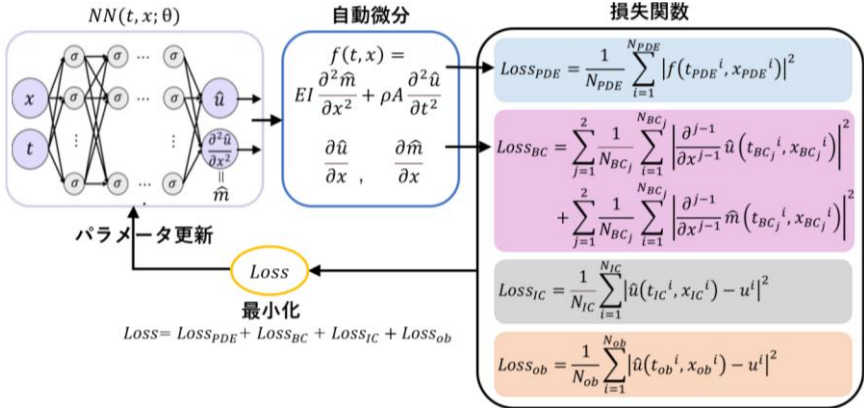


図-2 PINN の構造

キーワード シミュレーション, 振動解析, PINN, 機械学習, AR

連絡先 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

筑波大学院理工情報生命学術院システム情報工学研究群 TEL03-3355-3442

3. 逐次 PINN 予測によるリアルタイムシミュレーションと AR による可視化

構築した PINN をもとに、リアルタイム振動解析と解析結果の AR による可視化のための逐次 PINN 予測を構築した。リアルタイムシミュレーションでは、片持ち梁から変位データを取得しながら PINN で解析を行い、解析結果を Unity で作成した梁モデルに反映させ、その梁モデルを AR によって実物上に表示する。ここで AR 表示は ARtoolkit²⁾を用いて Unity³⁾上で開発を行った。PINN の解析では、細かいタイムステップ Δt で PINN を逐次学習・予測させるが、各タイムステップの学習に用いる NN のパラメータの初期値に前ステップのパラメータを引き継ぐことで PINN の学習時間の短縮を図った。また Δt を片持ち梁の振動周期に近い 0.4 sec とし、重みの更新回数が少なくなるようなパラメータのセットを引き継がせることで学習時間の最小化を図った。次のタイムステップの予測のための学習を Δt 内で行うことが出来れば、実現象と PINN で時間が共有、連動され、PINN によるリアルタイム解析が可能となる。

図-3 に変位と曲げモーメントの AR 表示の様子と、図-4(a)に $t=0\sim 1.2$ [sec](3 タイムステップ分)の PINN の逐次予測結果、図-4(b)に理論解を表す。シミュレーションの結果は、1 タイムステップにかかる解析時間が約 20 秒と AR 表示時間の 0.4 秒を上回り、AR 表示にタイムラグが生じたが、PINN を逐次的に学習させ計算時間短縮のための工夫を行うことで PINN の学習時のパラメータ更新回数は約 500 回となり、工夫しない場合と比べて計算コストが 40 分の 1 に低減した。さらに図-4 より PINN の解析結果は十分な精度を保っており、また変位に加え、目では見ることのできない応力の分布を AR

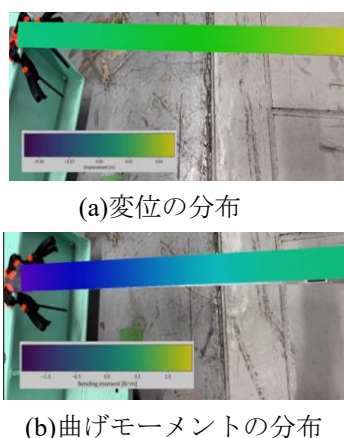


図-3 AR による変位と曲げモーメント解析結果表示

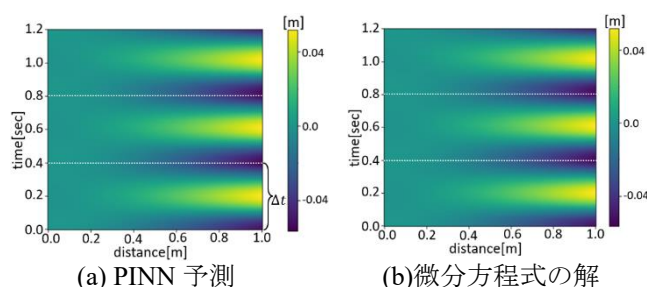


図-4 逐次 PINN による予測変位の精度

により可視化することが出来た。

4. 結論

本研究では、PINN を用いて片持ち梁の自由振動のリアルタイムシミュレーションを行い、その逐次解析結果を AR で可視化するフレームワークを構築した。PINN は構造や手法を工夫することで十分な精度を保ちながら、計算コストを大幅に短縮できることが分かった。振動周期に近い時間間隔をタイムステップとし、同様の重みを引き継ぐことで学習時間を短縮した。さらに、AR 表示と次のタイムステップの学習を並行して開始することで、学習から予測までの時間を短縮した。ただし学習時間がタイムステップの時間を大きく上回り、タイムラグが生じているため、今後は学習時間を短縮する工夫をしていく。また PINN と Unity 間の通信には改善の余地があるため、データ通信をスムーズに行うための方法を検討する。さらに実際に変位や加速度のデータを計測しながら、減衰振動や境界条件が動的に変化する片持ち梁の振動への適用を検討する。

謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR205T の支援を受けたものです。

参考文献

- 1) M. Raissi, P. Perdikaris and G. E. Karniadakis: Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. Journal of Computational physics, 378, pp.686-707, 2019.
- 2) ARtoolkit 株式会社エム・ソフト : <https://msoft.co.jp/service/artoolkit.html>
- 3) Unity ホームページ : <https://unity.com/>

キーワード シミュレーション, 振動解析, PINN, 機械学習, AR

連絡先 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

筑波大学院理工情報生命学術院システム情報工学研究群 TEL03-3355-3442