

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18873

研究課題名（和文）Supercomputed dataによる物理的地震被害推定人工知能構築手法開発

研究課題名（英文）Development of AI methodology with super-computed data for estimating earthquake disaster

研究代表者

市村 強（Ichimura, Tsuyoshi）

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：20333833

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,600,000円

研究成果の概要（和文）：地震被害軽減を目指す上で、地震被害推定の信頼性向上が必要とされ、多くの試みがなされている。高詳細モデルを用いた地震シミュレーションにおいて解析コストは大きく、この軽減が必要とされている。本研究課題では、大規模な数値シミュレーション結果（Supercomputed data）と物理的考察を踏まえた学習により、地震被害推定のための効率的な人工知能構築手法を開発し、適用例によりその有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

このような解析コスト削減の実現は、高速な即時地震被害想定や、多数シナリオを考慮した事前震災対策用想定への貢献が期待される。また、物理的考察を踏まえた人工知能化により、従来のequation-based modelingによる解析を、昨今の高演算密度に適した計算機アーキテクチャに親和性の高い演算へシフトすることで解析コストの低減を実現できることを示す等、equation-based modelingとdata-science的な手法の融合の可能性を示す結果となっている。

研究成果の概要（英文）：In order to mitigate earthquake damage, many attempts have been made to improve the reliability of earthquake damage estimation. In this research, we developed an efficient artificial intelligence method for earthquake damage estimation by learning from large-scale numerical simulation results (supercomputed data) and physical considerations, and demonstrated its effectiveness through application examples. The reduction of the analysis cost is expected to contribute to fast and immediate earthquake damage estimation and to the plan for earthquake disaster prevention that takes into account many scenarios. We also show that artificial intelligence based on physical considerations can reduce the cost of analysis by shifting the analysis from conventional equation-based modeling to operations that are more suitable for recent computer architectures. The results show the potential of combining equation-based modeling and data-science methods.

研究分野：地震工学，応用力学，計算科学

キーワード：人工知能 地震被害推定 大規模解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震被害軽減を目指す上で、地震被害推定の信頼性向上が必要とされ、多くの試みがなされている。高詳細モデルを用いた地震シミュレーションにおいて解析コストは小さくなく、この軽減が必要とされている。人工知能は一度構築してしまえば、それを用いた評価コストは非常に小さいため、シミュレーションの代替として地震被害推定に適用できれば大きな効果が期待される。地震は観測データが大量にあり、人工知能構築は容易と思われがちである。しかし、被害に至るような観測データはそれほど多いわけではない。また、観測を模擬したある程度の量のデータをシミュレーションにより生成し、これらを用いて人工知能を構築しても、データ量が十分でない場合、性能の良い人工知能を構築することはなかなか難しい。

2. 研究の目的

以上のような状況のもと、上記の課題の解決を目指すものが本研究課題である。大規模解析により得られた Supercomputed data と物理的考察を踏まえた学習により、地震による物理的な被害(構造物や地面の揺れ等)推定のための人工知能構築手法を開発し、その有効性を示すことを目的としている。なお、ここで開発を試みる人工知能構築手法は、物理現象一般に拡張することが可能であり、他分野への波及効果も期待される。CIM 等の空間情報利用の新たな動き・Society5.0 等の超スマート社会実現へ向け三次元空間情報の蓄積が進められ、高詳細なモデルが利用可能となる一方で、完全な三次元空間情報を整備することは難しく、情報の不確かさが生じる。解析コストの削減が可能となれば、このような情報の不確かさを考慮した上で、高速な即時地震被害想定や、多数シナリオを考慮した事前震災対策用想定が可能となり、懸念されている大地震への備えとして大きく役立つと期待される。

3. 研究の方法

本研究の対象は物理問題であるため物理的考察を活用可能である。そのため、従来とは桁違いの大規模・多数回のシミュレーション結果であり大情報量を持つ Supercomputed data を用いつつ、物理的拘束による効率的な人工知能構築手法の検討を行い、その有効性を示す。

4. 研究成果

本研究課題では、大規模シミュレーションの解析コスト削減可能な人工知能に基づく手法の開発を行った。主な成果を以下三項目説明する。

(1) 物理問題の性質を用いた人工知能によるシミュレーションの高速化手法(引用文献)

地震問題で頻出する非線形時間発展問題の応答評価の重要性は分野を問わず非常に高く、多くの分野でこの実現・効率化へ向けた研究がなされている。昨今の機械学習の飛躍的進化により、Neural Network (NN) によって非線形時間発展問題を学習しようという研究が多数なされている。一方で、超大規模解析が数多く発表される Supercomputing Conference においても partial differential equation (PDE) を解く非線形時間発展問題求解はメインテーマの一つであり、多くの研究がなされており、スパコン全系による複雑な形状を精緻にモデル化した 1 兆自由度を超える implicit solver による超高分解能非線形時間発展問題の応答評価なども実現されている。さらに、従来の PDE 求解スキームに NN を加えることによる更なる解析能力向上を目指した研究もなされつつある。このような多様な研究がなされているものの、"解析コストは高いものの高精度で解を求めることを指向する従来の PDE 求解スキーム"と"解析コストを抑制できるが精度がやや低くなる傾向にある NN ベースの評価"は、そもそもの両者の出自・目的が異なることによる解の要求精度のずれのため、融合不足が生じている状況にあり、さらなる両者融合の真価を発揮する余地がある。そこで、両者の融合をすすめる、NN により加速された超高分解能非線形時間発展問題の解析コストを軽減することを目的に、「PDE による解空間の拘束を効率的に行う NN により従来の PDE 求解スキームの性能を向上させる手法」を開発した。なお、NN の観点からは、「NN ベースの評価を任意精度で効率的に改善する収束性が保証された手法」を意味しており、精度保証が難しいとされる NN による評価の信頼性を担保していることになる。

非線形時間発展問題の PDE 求解で生じる、対象 PDE を線形化・離散化して得られた時間ステップ n における線形方程式系 $A u = f$ において u の求解を step by step ですすめることで、非線形時間発展問題の応答評価を行う問題設定で考える(ここで、 A 、 f は n ステップ目までの非線形時刻履歴により決まる既知の行列、ベクトルであり、ある程度の大きさの系なので implicit iterative solver により、 u を求めることを想定している)。PDE 求解スキームでは、反復解法により相対誤差 10^{-8} となる近似解 u^{app} を求める。一方の NN ベースのアプローチでは、限られたケースのシミュレーションで得られた近似解 u^{app} を用いて(PDE 求解スキームに負けない解析コスト・スピードのレベルで)解析コストを抑制しつつ NN により A^{-1} を近似した B を生成し、これを適用して得られる $B f$ を近似解として考えることが多い。しかし、非線形の時刻歴応答の大域的・局所的、また、動的なトランジットな挙動を含んだ A^{-1} を解析コストを抑制した NN で十分

な精度で再現することはなかなか難しい。本研究では、上記の近似解 u^{app} を学習するのではなく、PDE の性質を反映する Green Function を学習することとする。効率的に解空間の拘束が可能となるため、 $10^{-3\sim 2}$ 程度の相対誤差で推定可能な性能の良い NN (以下、GF-based NN: Green Function-based NN と呼ぶ) が構築することが出来た。

GF-based NN は高精度だが、これだけを用いて上記の時刻歴問題を解くと時間がたつと解が正解から外れていってしまう。PDE で必要とされる精度は 10^{-8} であり、この乖離が問題となる。そのため、この問題を解決可能な、GF-based NN と PDE による解空間の拘束を用いて、GF-based NN による解を任意精度で効率的に改善する収束性が保証された手法を開発した。精度保証レベル (相対誤差) に応じて解を改良することができる。なお、本手法により相対誤差 10^{-8} で解を得ることは、従来の PDE 求解のスキームの観点からは、GF-based NN により従来の PDE 求解スキームの性能を向上させていることに相当している (GF-based NN を共役勾配法の前処理として用いることに相当しており、良好な前処理性能により収束性を改善している)。本手法は、従来の PDE 求解のスキームに比べ 5.48 倍高速に解を得ることに成功しており、十分な time to solution の改善となっている。なお、昨今の計算機アーキテクチャへの親和性が低い従来の PDE 求解スキームを計算機アーキテクチャへの親和性が高い連続メモリアクセス卓越型の NN ベースの評価に解析コストを移行させることで、より効率的な (高い実効性能で) 演算を可能としたという高性能計算科学的な観点からの新規性もこの time to solution の改善への寄与は大きい。実際、CPU よりも連続メモリアクセス卓越型の演算に親和性の高い GPU へ本手法を移植したところ更なる高速化が達成された (引用文献)。以上から、本研究は、地震シミュレーションで頻出する非線形波動場解析において、情報科学・計算科学・高性能計算科学の長所を融合することで、昨今の計算機アーキテクチャの特性を活かした効率的な、「従来の PDE 求解のスキームの観点からは NN により従来の PDE 求解スキームの性能を向上させる手法」、「NN の観点からは PDE による解空間の拘束により NN ベースの評価を任意精度で効率的に改善する収束性が保証された手法」を提案しており、物理問題の性質を用いた人工知能の有効性を示している。

(2) 人工知能を用いたシミュレーションモデルの信頼性向上手法 (引用文献)

地震シミュレーションで頻出する地盤増幅解析で使われる地盤構造モデルの信頼性向上を図る。観測データを用いた内部構造パラメータ最適化であり、その過程で多数の forward 解析が必要となるため、膨大な解析コストがかかる。そこで、forward 解析によって生成される Supercomputed data を用いてニューラルネットワークを構築し、これにより forward 解析を代用することで forward 解析の回数を減らすアプローチを提案し、実用上十分な精度で構造の内部モデルを推定できることを示した。また、一般的な最適化手法と比較して、提案手法はより短時間でパラメータを推定できることを確認した。

(3) Supercomputed data を用いた大規模シミュレーションの代理モデルの構築 (引用文献)

GPU クラスタ上で効率化した三次元液状化解析手法を用いて、多数回の解析を行い、Supercomputed data を生成した。この Supercomputed data を用いて液状化解析の代理モデルである人工知能を構築し、良好な精度で大規模シミュレーション結果を推定可能なことを示した。多数回解析の実現により、Uncertainty Quantification 等への展開が期待される。

<引用文献>

Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Muneo Hori, Lalith Maddeggedara, Naonori Ueda, Yuma Kikuchi, A Fast Scalable Iterative Implicit Solver with Green's function-based Neural Networks, 2020 IEEE/ACM 11th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systems (ScalA), 61-68, 2020.

Kohei Fujita, Yuma Kikuchi, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Lalith Maddeggedara, and Naonori Ueda, GPU porting of scalable implicit solver with Green's function-based neural networks by OpenACC, Proceedings of Eighth Workshop on Accelerator Programming Using Directives, 1-10, 2021.

Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Muneo Hori, Lalith Wijerathne, Naonori Ueda, Fast Multi-Step Optimization with Deep Learning for Data-Centric Supercomputing, ACM International Conference Proceeding Series 7-13, 2020.

Takuma Yamaguchi, Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Muneo Hori, Lalith Wijerathne, Naonori Ueda, Data-Driven Approach to Inversion Analysis of Three-Dimensional Inner Soil Structure via Wave Propagation Analysis, Lecture Notes in Computer Science, 12139, 2020.

Ryota Kusakabe, Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Muneo Hori, Lalith Wijerathne, GPU-accelerated Multiphysics-based Seismic Wave Propagation Simulation and its Surrogate Model with Machine Learning, poster #105, The International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPC Asia 2022), 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yamaguchi Takuma, Ichimura Tsuyoshi, Fujita Kohei, Hori Muneo, Wijerathne Lalith, Ueda Naonori	4. 巻 12139
2. 論文標題 Data-Driven Approach to Inversion Analysis of Three-Dimensional Inner Soil Structure via Wave Propagation Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 3~17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-50420-5_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ichimura Tsuyoshi, Fujita Kohei, Hori Muneo, Maddeggedara Lalith, Ueda Naonori, Kikuchi Yuma	4. 巻 1
2. 論文標題 A Fast Scalable Iterative Implicit Solver with Green's function-based Neural Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE/ACM 11th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systems (ScaLA)	6. 最初と最後の頁 61-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ScalA51936.2020.00013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ichimura Tsuyoshi, Fujita Kohei, Yamaguchi Takuma, Hori Muneo, Wijerathne Lalith, Ueda Naonori	4. 巻 1
2. 論文標題 Fast Multi-Step Optimization with Deep Learning for Data-Centric Supercomputing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 HP3C 2020: Proceedings of the 2020 4th International Conference on High Performance Compilation, Computing and Communications	6. 最初と最後の頁 7-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3407947.3407949	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Fujita Kohei, Kikuchi Yuma, Ichimura Tsuyoshi, Hori Muneo, Maddeggedara Lalith, Ueda Naonori	4. 巻 1
2. 論文標題 GPU Porting of Scalable Implicit Solver with Green's Function-Based Neural Networks by OpenACC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Accelerator Programming Using Directives: 8th International Workshop	6. 最初と最後の頁 73~91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-97759-7_4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ryota Kusakabe, Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Muneo Hori, Lalith Wijerathne
2. 発表標題 GPU-accelerated Multiphysics-based Seismic Wave Propagation Simulation and its Surrogate Model with Machine Learning
3. 学会等名 The International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPC Asia 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------