

機械学習による重力波解析コードの開発

Development of machine learning codes for gravitational wave analysis

本橋隼人
東京都立大学

1. 研究目的

(1) 中性子星連星・中性子星-ブラックホール連星合体からの重力波解析

中性子星は高密度物質の状態方程式に関する情報をもたらすため、その合体過程を解析することは基礎物理学的にも大きな意義がある。本研究では機械学習を用いることで、多様なパラメータに対応した重力波解析を効率化し、従来よりも詳細な情報を得ることを目指す。

(2) 最適化手法の効率化とその応用

波形生成や学習過程における計算コストを抑えながら高精度な推定を実現するため、最適化手法を洗練させるとともに、大規模データ解析にも耐えうるアルゴリズム設計を行う。新しい最適化手法を応用することで、機械学習を用いた数値相対論を開拓する。

2. 研究成果の内容

(1) 中性子星連星・中性子星-ブラックホール連星合体からの重力波解析

まず信号長が短く解析が比較的容易と考えられる恒星質量ブラックホールの連星合体を想定して、解析パイプラインの開発を行った。訓練データを効率的に生成するために、整合フィルタを GPU に適合した `pytorch` ライブラリで実装した。これによりデータ生成にかかる時間を約 100 倍短縮できた。訓練データを生成し、整合フィルタと畳み込みニューラルネットワークとを組み合わせたパイプラインを実装した。そして、模擬データを用いて性能評価を行った。本研究では、MLGWSC-1 というデータチャレンジでの設定およびコードを用いて、模擬データによる性能評価、および他の標準的手法 (PyCBC) や機械学習手法と比較した。その結果、我々のアルゴリズムは標準的手法と同程度の性能を 2 倍程度早い計算時間で得られることがわかった。また、他の機械学習手法と比べても遜色ない計算時間で、性能はそれらよりも向上した。これにより我々の手法が現実的なデータ解析に対しても有用であるという示唆が得られた。本研究の成果は *Physical Review D* 誌から出版された。

(2) 最適化手法の効率化とその応用

昨年度は、これまで我々が考案していた最適化手法の理解をスケール不変性からの観点で深め、より一般化させた。これまで我々が考案していた最適化手法

は、式のスケール変換に対して不変な勾配項と、収束を加速させる慣性項から構成されていた。この勾配項が、行列スケーリングで用いられる Sinkhorn 反復によって一般化できることがわかった。すなわち、Sinkhorn 反復を有限回で停止するとこれまでの「式のスケール変換に対して不変な勾配項」が得られる。一方で、Sinkhorn 反復の漸近先が「式のスケール変換および変数のスケール変換に対して不変な勾配項」であることを見出し、数値実験によって Sinkhorn 反復回数が解への収束速度を改善することを確認した。また、これは既存の最適化手法である Cimmino 法や画像再構成の SIRT 法の一般化とみなせることがわかった。この内容は日本物理学会(2025 年 9 月 16 日-19 日)において田原によって発表された。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本プログラムでは訓練データの生成およびニューラルネットワークの訓練を効率的に行うことができた。

4. 今後の展望

(1) 中性子星連星・中性子星-ブラックホール連星合体からの重力波解析

本年度の一つの目標は、我々の手法を現実的なデータに適用して、LIGO-Virgo-KAGRA コラボレーションによる解析では発見できなかったような信号を探索することである。そのためには検出器由来の突発的ノイズとの見分け方を実装する必要があるので、これに取り組む。

もう一つの目標は、中性子星連星・中性子星-ブラックホール連星合体からの重力波信号に応用することである。これらの信号は、ブラックホール同士の合体で得られる信号に比べて、100 倍程度信号長が長い。そのため、データ解析にかかる時間、信号の途中で突発的ノイズが重なる状況などを考慮に入れなければならない。これらの長時間信号に対する手法拡張が 2 つ目の目標である。

(2) 最適化手法の効率化とその応用

本年度は、本最適化手法の重要部分が改良されたので、この内容で論文原稿を修正中である。最終的な目標である機械学習的手法を応用した数値相対論のために、拘束条件を満たす解空間への射影として本最適化手法を用いる手法を開発する。これは、古典的ルンゲ・クッタ法で得られる時間発展に対して、本最適化手法の反復を(有限回)おこない、拘束条件を満たす解空間に収束・射影させるものである。現時点で JAX を用いて適合細分化格子上で運動方程式の時間発展を解く部分が既に実装済みであり、次段階として、拘束条件の収束に本最適化手法を応用する部分を開発する。

5. 成果発表

(1) 学術論文

Takahiro S. Yamamoto, Kipp Cannon, Hayato Motohashi, Hiroaki W. H.

Tahara, “Hybrid algorithm combining matched filtering and convolutional neural networks for searching gravitational waves from binary black hole mergers”, Phys. Rev. D 113, 062004 (2026), [arXiv:2512.12399].

(2) 学会発表

・(口頭発表) 田原弘章, 本橋隼人, “スケール不変性に着目した最適化手法の開発と応用”, 日本物理学会第 80 回年次大会, 2025 年 9 月 16 日-19 日, 名古屋大学

・(ポスター発表) Takahiro S. Yamamoto, Kipp Cannon, Hayato Motohashi, Hiroaki W. H. Tahara, “Hybrid algorithm combining matched filtering and convolutional neural networks for searching gravitational waves from binary black hole mergers”, 第 38 回理論懇シンポジウム, 2025 年 12 月 17 日~19 日, 筑波大学

・(ポスター発表) Takahiro S. Yamamoto, Kipp Cannon, Hayato Motohashi, Hiroaki W. H. Tahara, “Hybrid algorithm combining matched filtering and convolutional neural networks for searching gravitational waves from binary black hole mergers”, LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration Meeting, 2026 March 9-13, Pisa, Italy

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース*		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	3200		0
Miyabi-G	○	7200	0	0
Miyabi-C	○	630	0	0
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				