

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) 中性子星連星合体からの重力波の解析

歳差運動がある中性子星連星合体重力波信号を検出するため、長時間のデータを扱うための機械学習手法を開発する。

(2) 最適化手法の効率化

偏微分方程式の数値解を機械学習の手法によって得るため、物理学の問題に特化した最適化手法を開発する。

2. 研究成果の内容

(1) 中性子星連星合体からの重力波の解析

長時間信号に含まれている情報を効率的に縮約するために、テンプレートマッチの結果をニューラルネットワークの入力とするアルゴリズムを考案した。このアイデアに基づいて、まずはテンプレートマッチの結果を、横軸に時間、縦軸に理論波形のパラメータ（チャープ質量）をとり、信号対雑音比（SNR）のカラーマップとして表現した。この 2 次元データを画像としてニューラルネットワークの入力とし、重力波信号があるかないかを判定するように訓練することにした。まずは比較的信号が短い 50-200 太陽質量のブラックホール連星をターゲットにして、訓練データを生成しニューラルネットの訓練およびテストを行なった。その結果、先行研究に比べて 1.5 倍程度の検出体積が得られることがわかった。この結果は連星中性子星の探索において、本アルゴリズムが有用であることを期待させる結果である。

(2) 最適化手法の効率化

メモリーレス準ニュートン法から着想を得た新しい最適化手法を考案し、収束性や理論的意味を検討するとともに、いくつかの例で数値実験による検証を行なった。我々が考案した方法は、ブロイデン法と呼ばれる準ニュートン法に類似しており、知られているブロイデン法の証明を拡張することで収束条件を導くことができた。数値実験においては、我々が考案した最適化手法を代数方程式の求根や偏微分方程式の積分に適用し、特に変数が多い場合において従来の方に対する優位性を確認することができた。

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) 中性子星連星合体からの重力波の解析

今後は連星中性子星合体からの重力波を対象としてニューラルネットワークを訓練し、その性能評価を行う。そして実際の観測データに適用し、既存のパイプラインで検出されていないような信号がないかを探索する。

(2) 最適化手法の効率化

これまでの研究成果により、新しい最適化手法の妥当性と有効性が理論と数値計算の両面から示されたので、まずこれを論文としてまとめて出版する。その後、より複雑な問題に最適化手法を適用し、本手法の有効性を検証する。たとえば拘束条件を満たしながら時間発展する系において、その拘束条件が楕円型偏微分方程式の形になることがあるが、各時刻でそれを解きながら発展を計算するのは大きな系では現実的ではない。新変数を導入し漸近的に拘束条件が満たされるように計算される手法は、しばしば経験的に得られた手法である。我々は新しい方法として、各時刻における微小な時間発展に対して本最適化手法の反復をおこなうことで、満たすべき拘束条件(楕円型偏微分方程式の解)に収束させることを試みる。この手法での数値計算を実現するためコード開発を進めており、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る。これらの応用例の実装で、本最適化手法で追加される項の必要性を明らかにすることを目指す。

5. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

田原弘章「曲率を考慮した勾配法による数値解の反復的探索」国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング (2024 年 11 月 25 日-26 日、国立天文台)

田原弘章「Iterative search for numerical solutions by gradient method considering curvature」Future of Artificial Intelligence for Science in Japan (2024 年 12 月 3 日-5 日、名古屋大学)

(3) その他

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	追加配分
Cygnus	○	3600	0	0
Pegasus	○	2250	0	0
Wisteria/BDEC-01	○	7200		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
--	---