

リングダウン重力波の開始時刻推定のためのニューラルネットワークの最適な構成の検討

大湊 悠貴[†][†] 長岡工業高等専門学校 電子制御工学科酒井 一樹^{††}^{††} 長岡工業高等専門学校 電子制御工学科

1. はじめに

重力波とは、天体など質量のある物体が加速度運動をした時に生じる波の事であり、1916年にアインシュタインがその存在を予言した。それから100年後の2016年に、米国の観測施設LIGOが重力波の直接観測に成功している。本研究で解析する重力波は連星ブラックホール合体によるものであり、この重力波はインスパイラル重力波、マージャー重力波、リングダウン重力波の3段階に分けられる。特にリングダウン重力波は重力理論の検証に有用である。しかし、重力波の振幅は非常に小さく、観測データにおいては簡単にノイズに埋もれてしまう。そのため不要なノイズを除去し、重力波源のパラメータを推定する、高度なデータ解析技術が必要となる。

先行研究[1]では、ノイズを含んだデータからリングダウン開始時刻の推定を行う手法として、ディープラーニングを用いたネットワークを構築している。ノイズを含まないデータでは十分な結果が得られている一方で、ノイズを含むデータにおいては、その精度に向上の余地がある。本研究ではより高精度な推定ができるニューラルネットワークを構築することを目指す。

2. リングダウン重力波

リングダウン重力波はブラックホール合体の準固有振動(QNM)に由来し、以下の式で表される。

$$h_{QNM}(t) = A_0 e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}} \cos(2\pi f_c(t-t_0) + \varphi_0) \quad (1)$$

A_0 は初期振幅、 φ_0 は初期位相である。 f_c 、 τ はそれぞれQNM周波数、QNM減衰時定数と呼ばれ、この2つの推定が特に重要となる。その推定にはリングダウン重力波の開始時刻 t_0 の決定が必要となるが、その時刻を求める手法はまだ確立されていない。現在では、複数の開始時刻を仮定していくつかの推定結果を求めている。

3. リングダウン開始時刻推定ネットワーク

入出力データとニューラルネットワークの概要を表すネットワークの構成を図1に示す。

元の重力波から先行研究[2]の手法を用いて開始時刻 t_0 を推定し、これを正解データとする。次に重力波形にノイズを加え、畳み込みニューラルネットワークを用いて開始時刻 \hat{t}_0 を推定する。そして \hat{t}_0 が t_0 に近づくように逆伝播して学習を行う。

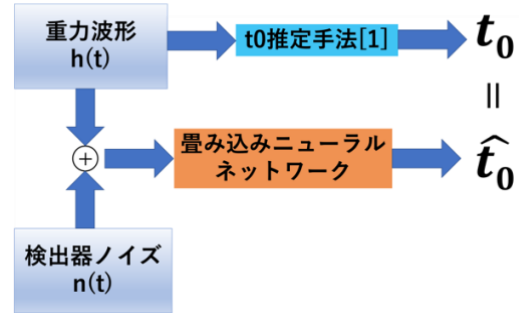


図1. ネットワーク構成図

4. GradCAM

最適なネットワークの構成を探す過程で Grad-CAM を用いて CNN の判断根拠を可視化した。可視化例を図2に示す。赤線は CNN が重要視した部分を表している。

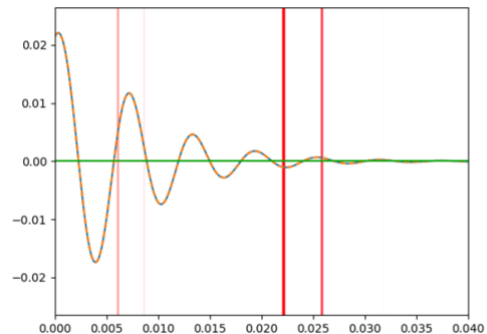


図2. Grad-CAM 出力例

図2より、波形の後半を局所的に見ていることがわかる。そのため、狭い範囲の畳み込みを行うべきだと考察できる。

5. まとめ

今後はこの Grad-CAM の結果を元にネットワークの構成を検討したい。

参考文献

- [1] 青木尚登, “ディープラーニングを用いたリングダウン重力波の開始時刻推定”, 長岡工業高等専門学校 専攻科 電子機械システム工学専攻 修士論文, 2021
- [2] K. Sakai, *et. al.*, “Estimation of starting times of quasinormal modes in ringdown gravitational waves with the Hilbert-Huang transforms”, *Phys. Rev. D* **96**, 044047 (2017)
- [3] Pytorch を使って CNN の判断根拠を可視化する Grad-CAM を実装してみた
https://qiita.com/m_k/items/0a841a1a93d70a663c39