

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：53101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14717

研究課題名（和文）重力波データ解析とディープラーニング型ノイズ除去の融合による重力理論検証の新展開

研究課題名（英文）New Developments on Tests of Gravity Theory by combining Gravitational Wave Data Analysis and Deep Learning based Denoising

研究代表者

酒井 一樹 (Sakai, Kazuki)

長岡工業高等専門学校・電子制御工学科・助教

研究者番号：40824298

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：重力波の直接観測が実現され、重力波観測による強く動的な重力場における重力理論の検証が行えるようになると期待されている。観測データを解析するためにはデータに含まれるノイズの影響をいかに排除するかが課題となっている。本研究ではディープラーニングを用いて重力波観測データに対する新しいノイズ除去方策を検討する。複数通りの方針について、実際にシミュレーションデータを用いた性能評価を行い、有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではディープラーニングを用いた重力波観測データに対するノイズ除去方法について検討し、その有効性を確認した。ノイズ除去が実行できれば、重力波の観測データを用いた重力理論検証の新たな方向性を生み出すことが期待される。具体的には、Hilbert-Huang変換や自己回帰モデルなどの時間領域での時系列データ解析は、周波数領域での解析手法よりもノイズの影響を大きく受けるかわりに、ブラックホールの準固有振動などのより詳細な解析ができると知られている。これらの手法をより高度に活用するために、本研究の成果が役立つと期待される。

研究成果の概要（英文）：Advanced LIGO succeeded in the first direct detection of gravitational waves, and the era of gravitational wave astronomy started. It is expected that we can test gravity theories in strong dynamic gravity fields by observing gravitational waves. Analyzing observed data requires reducing the effect of noise that is contained in the data. In this research, I proposed and evaluated brand-new deep learning-based noise reduction methods for gravitational wave observed data. I conducted performance tests with simulated data for multiple methods and confirmed their effectiveness.

研究分野：重力波物理学

キーワード：重力波物理学 ブラックホール ノイズ除去 ディープラーニング 時系列データ解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2015年にAdvanced LIGOが重力波の初の直接観測を果たし、重力波天文学が幕開いた。重力波観測によって、強く動的な重力場における重力理論の検証が行えるようになると期待されている。特に、ブラックホールの準固有振動に重力理論の違いが現れると考えられており、その周波数の解析による重力理論の検証方法が提唱され、検討が進められている。

ブラックホールの準固有振動は連星ブラックホール合体 (BBH: binary blackhole) からの重力波における最後のリングダウンフェーズとして現れる。合体後に形成されたブラックホールが定常状態へと遷移する課程である。ただし、BBHからの重力波において、準固有振動の周波数を解析するためには、準固有振動の開始時刻を精度良く推定する必要がある。研究代表者はHilbert-Huang変換 (HHT) を用いた開始時刻の推定手法を提案しており、ノイズを加えていない波形に対する高い性能を実現している。しかしながら、ノイズが存在するデータにおいてはノイズ起因の系統誤差が現れることがわかっており、いかにしてノイズの影響を除去するかが次の課題となっている。

準固有振動の解析に限らず、重力波の観測データ解析においては、ノイズの影響をいかに排除するかが常に課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、データ解析技術を用いることで、実観測データからノイズを除去する方法を確立することを目的とする。もちろん、ノイズの影響を排除するために最も重要なことはノイズハンティングや干渉計のアップグレードによる高感度化といったハードウェア側の実験研究であるが、すでに観測済みのデータにおいてはデータ解析による方法を検討するしか無い。データからノイズを除去するための基本方針は、デジタルフィルタを用いてノイズだけの周波数帯域を遮断し、信号の含まれる帯域のみを残す、というものである。一方で、観測データに含まれる重力波信号の帯域は重力波源によって異なるため、デジタルフィルタを手作業で適切に設計することは非常に手間がかかる。

近年、データ駆動型アルゴリズムである機械学習、特にディープラーニングに注目が集まっており、画像認識や音声認識、自然言語処理の分野で著しく大きな成果をあげている。重力波データ解析においても活用例が報告され始めており、さらなる検討が期待されている状況である。本研究では、このディープラーニングを用いた高精度なノイズ除去システムの構築を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、ディープラーニング技術を重力波のデータ解析、特にノイズ除去に応用する方法を検討する。ここで扱うディープラーニングとはディープニューラルネットワークを指す。ここではまずニューラルネットワークの原理を簡単に説明し、その後、本研究で構築したモデルについて解説する。

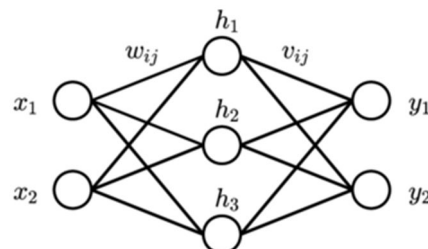


図 1: 2層ニューラルネットワーク

図 1 に入力層と出力層、そして 1 つの隠れ層がある 2 層ニューラルネットワークの構成図を示す (3 層あるが、入力層は数えないのが一般的である)。各層は 1 つの値を保持するユニット (ニューロンともいう) 複数個によって構成される。この例では入力層が 2 つのユニット (x_1, x_2)、隠れ層が 3 つのユニット (h_1, h_2, h_3)、出力層が 2 つのユニット (y_1, y_2) で構成されている。各層は次のように線形結合と非線形関数 f でつながっている。

$$h_j = f(\sum_k w_{kj} x_k + b_j),$$
$$y_i = f(\sum_j v_{ji} h_j + c_i).$$

f のことを活性化関数とも言う。この線形結合における係数 w_{ij} や v_{ij} がニューラルネットワークのパラメータであり、誤差逆伝播法という計算により、出力 y_1, y_2 が目的の値に対して近くなるようにこのパラメータの値を更新していくことが学習と呼ばれる。本研究で行うことは、この誤差の計算を、ノイズを除去できているかどうかという観点に対応させたネットワークを構築するということである。

本研究では、大きく以下の2つの方針について検討を行い、成果をあげることができた。

- (1) ノイズを除去した重力波波形をそのまま出力するニューラルネットワーク
 - (2) ノイズを除去するためのフィルタのパラメータを出力するニューラルネットワーク
- 以下ではそのそれぞれについての概要を説明する。

まず、(1)のノイズを含むデータを入力したときにノイズを除去した重力波波形を出力するニューラルネットワークの検討について説明する。重力波波形を $s[k]$ 、ノイズを $n[k]$ とすると、入力 $x[k]$ は

$$x[k] = s[k] + n[k]$$

と表され、ニューラルネットワークの出力を $y[k]$ としたときに

$$L = \sum_k (y[k] - s[k])^2$$

を最小にするようにニューラルネットワークを学習させるということである。このように入力からノイズを低減させた波形を出力するシステムのことをノイズ除去自己符号化器 (DAE: Denoising Autoencoder) という。

このニューラルネットワークの検討の第1段階として、2層ニューラルネットワークによるDAEで、サインガウシアン波形に対するノイズ除去を検討した。サインガウシアン波形は単一のピークを持つ突発的信号として、超新星爆発による重力波の最も簡単なモデル化としてよく用いられる波形である。DAEを単一で用いるのではなく、複数個のDAEをそれぞれ独立に学習させ、それらを直並列に連結させることで性能を向上できないかという評価も行った。

続いて、より実際に近いデータへの適用性を調べるために、ブラックホールの準固有振動による重力波を対象とした評価、そして、連星ブラックホール合体からの重力波を対象とした評価を行った。このように学習を高度にするにはニューラルネットワークの層を深くすることが常套手段である。ここでは、層を深める方針として、音声認識等の時系列データ処理において顕著な成果をあげているリカレントニューラルネットワークの応用を検討した。

続いて、(2)のフィルタのパラメータを出力するネットワークについて説明する。これは出力結果に対する再現性や説明能力を高めるための方針である。デジタルフィルタはいくつかのパラメータを指定することで設計できる。そのパラメータの集合を θ とし、パラメータ θ のフィルタのインパルス応答を $g[k; \theta]$ とすると、 $x[k]$ を入力した際の出力 $y[k; \theta]$ は

$$y[k; \theta] = g[k; \theta] * x[k]$$

という畳み込み演算で計算される。今回構築するネットワークは θ を出力し

$$L = \sum_k (y[k; \theta] - s[k])^2$$

を小さくするようにネットワークのパラメータを学習させるというものである。ニューラルネットワークとしてはこの場合には畳み込みニューラルネットワークを用いた。畳み込みニューラルネットワークは画像処理などにおいて非常に優れた成果をあげているネットワークであり、近年、dilation という技術を取り入れることで、時系列データ処理においても効果を発揮できるという研究成果が報告されており、その技術の検討を行った。

これらのニューラルネットワークの計算を効率よく行うには GPGPU という技術を用いる必要がある。本研究では、助成により購入した GPU を搭載した計算サーバを用いた。プログラミング言語としては Python を主として用い、ディープラーニングのライブラリには Tensorflow および PyTorch の利用を検討した。

4. 研究成果

研究方法の節で述べたように、本研究では主に2つノイズ除去の方針について検討を行った。ここでは方法および対象別に3つに分けてそれぞれ成果を報告していく。

(1) 2層ニューラルネットワークによるサインガウシアン波形のノイズ除去

図2に示すようなサインガウシアン波形と無信号のデータについて、これらにノイズを加えたデータを入力した際に、ノイズを除去した信号を出力する DAE を構築した。

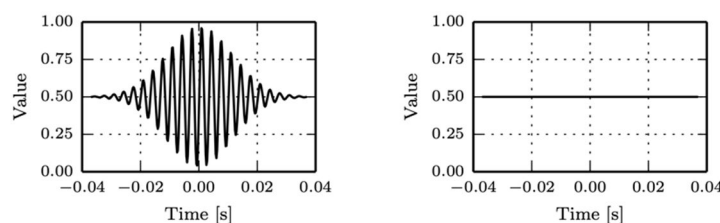


図2: サインガウシアン波形と無信号波形

この際、独立して学習させた DAE を複数個並列にする Ensemble DAE (E-DAE) という方式を提案・検討した。その概要図を図 3 に示す。また、E-DAE を用いてノイズ除去の性能評価を行った結果を示した図の一部を図 4 に示す。上段の図がノイズを加えた入力波形であり、中段の図が DAE を 1 つ使った場合のノイズ除去結果、下段の図が DAE を 2 つ並列させた場合の E-DAE でのノイズ除去結果である。この図から、サインガウシアン波形において、DAE でノイズ除去を行う可能性が確認でき、E-DAE を構築することで単一の DAE よりも性能を向上させられるという知見を得ることができたと言える。

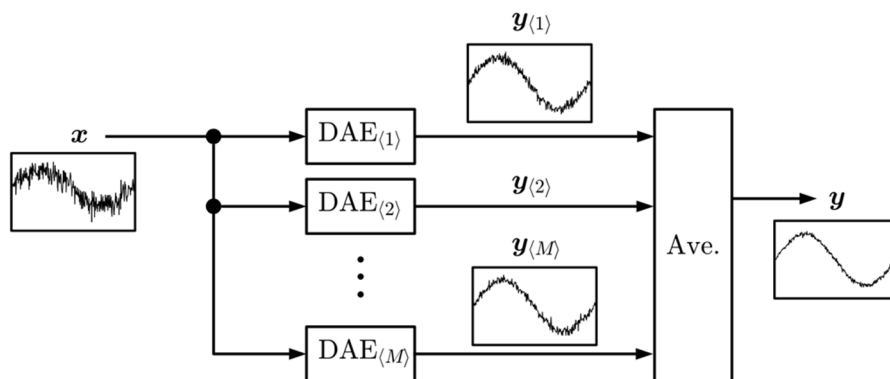


図 3: Ensemble DAE の概要図

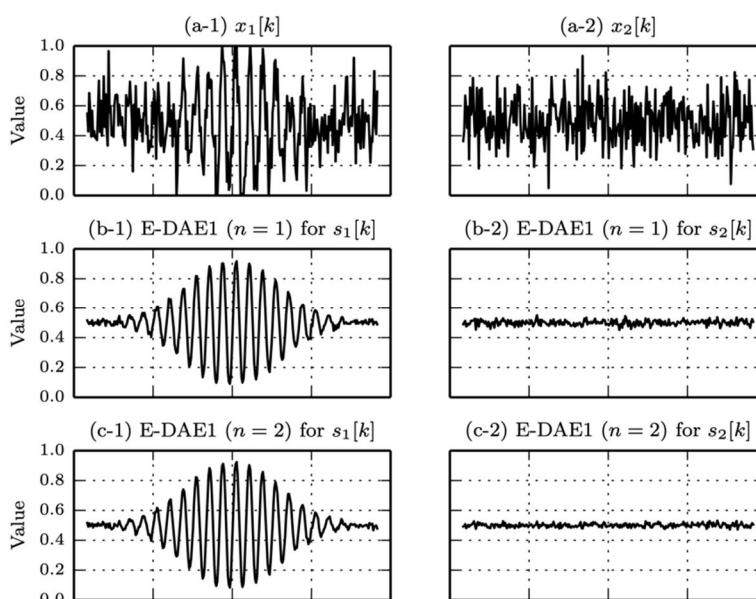


図 4: Ensemble DAE でのノイズ除去結果

(2) リカレントニューラルネットワークによる重力波波形のノイズ除去

続いて、ブラックホールの準固有振動による重力波や、連星ブラックホール合体による重力波などを対象とした検討を行った。構築したネットワークを図 4 に示す。

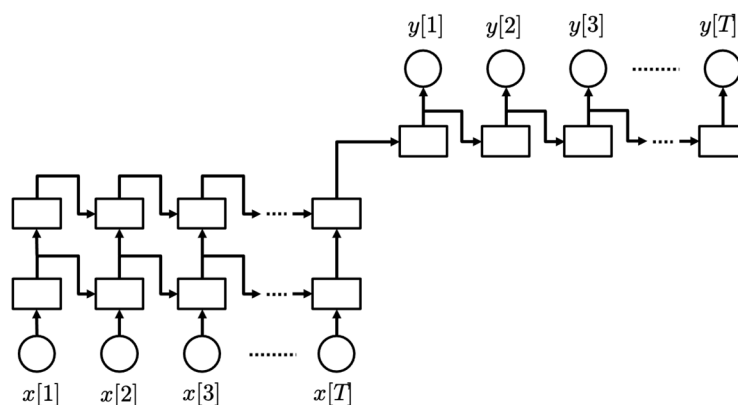


図 4: リカレントニューラルネットワークによる Sequence-to-Sequence モデル

これはリカレントニューラルネットワークという時系列的な依存関係を学習に取り入れたモデルを用いて、時系列データから時系列データを出力する Sequence-to-Sequence モデルというものである。この Sequence-to-Sequence モデルを用いて、準固有振動による重力波に対してノイズ除去性能を確認した結果を示したのが図 5、連星ブラックホール合体重力波に対して性能評価を行った結果が図 6 である。これらの図を見てわかるように、実際の重力波波形のシミュレーションデータに対しても、ディープラーニングを用いたノイズ除去が有効であるということが確認できた。

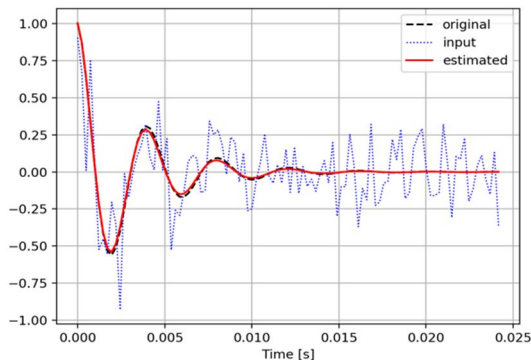


図 5: 準固有振動重力波へのノイズ除去結果

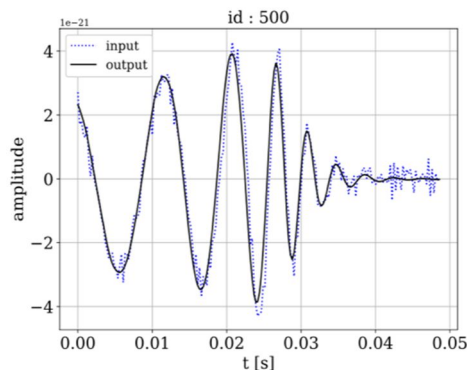


図 6: BBH 重力波へのノイズ除去結果

(3) 畳み込みニューラルネットワークによるノイズ除去のためのフィルタ構成

これまでの方針でノイズ除去の高い性能をあげることができたが、一方で、学習データに過適合してしまうという困難があることがわかった。どのデータを使って学習させたか、によって結果が変わってしまうと、その結果に対しての信頼性や説明能力という点で課題が残る。

そこで、説明能力を有したノイズ除去方針として、ノイズ除去自体はデジタルフィルタを用い、ディープラーニングによってそのフィルタのパラメータを設計する、という方針の検討を始めた。第 1 段階として、バンドパスフィルタの 2 つのカットオフ周波数を推定するシステムを構築した。構築したフィルタ設計のネットワークの概要図を図 7 に、このシステムでの BBH 重力波に対するノイズ除去性能の評価結果を図 8 に示す。ノイズを低減させるための適切なバンドパスフィルタを設計できていることがわかる。

低周波のカットオフ周波数の設定にさらなる改善の余地がありそうだという点と、フィルターを 1 つではなく多段にするという点が今後の課題となっている。

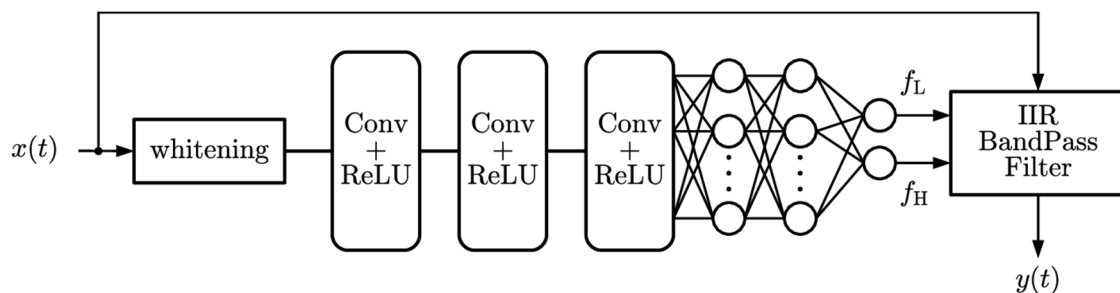


図 7: フィルタ設計ニューラルネットワークの概要図

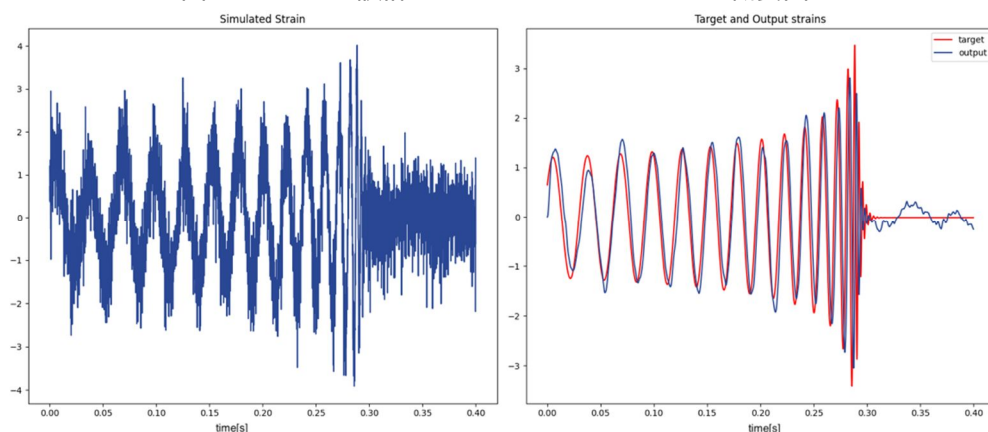


図 8: フィルタ設計ニューラルネットワークによる BBH 重力波への適用結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nami Uchikata, Tatsuya Narikawa, Kazuki Sakai, Hirotaka Takahashi, Hiroyuki Nakano	4. 巻 -
2. 論文標題 Black hole spectroscopy for KAGRA future prospect in O5	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.024007	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 Hiroyuki Hayashi, Kazuki Sakai, Hiroyuki Hamazumi, Hirotaka Takahashi, Yuto Omae	4. 巻 14
2. 論文標題 A Basic Study of Noise Reduction on the Analysis of Burst Gravitational Waves by Direct and Parallel Denoising Autoencoder	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ICIC Express Letters	6. 最初と最後の頁 337-345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24507/icicel.14.04.337	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 オドンチメド ソダウィラン, 高橋弘毅, 酒井一樹
2. 発表標題 ニューラルネットワークによる重力波波形再構成のための最適なフィルターデザインの生成
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 住安宏介, 酒井一樹
2. 発表標題 重力波の観測データに対するリカレントニューラルネットワークを用いたノイズ除去の検討
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会 ISS学生ポスターセッション
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林滉之, 酒井一樹, 高橋弘毅, 濱住啓之, 大前佑斗
2. 発表標題 L2正則化を導入した直並列型 Denoising Autoencoder を用いたバースト重力波解析におけるノイズ除去の基礎的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 酒井一樹, 高橋弘毅, 大原謙一
2. 発表標題 リカレントニューラルネットワークを用いた重力波観測データにおけるノイズ除去の検討
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内潟那美, 酒井一樹, 高橋弘毅, 中野寛之, 成川達也
2. 発表標題 KAGRAアップグレードに向けたブラックホール準固有振動解析
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Hayashi, Kazuki Sakai, Hiroyuki Hamazumi, Hirotaka Takahashi, Yuto Omae
2. 発表標題 A Basic Study of Noise Reduction on the Analysis of Burst Gravitational Waves by Direct and Parallel Denoising Autoencoder
3. 学会等名 14th International Conference on Innovative Computing, Information and Control (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1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
---------	---------