

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05437

研究課題名（和文）適応型時間-周波数解析と機械学習を組み合わせた重力波探査法の研究

研究課題名（英文）Method of Gravitational Wave Search Based on Adaptive Time-Frequency Analysis and Machine Learning

研究代表者

高橋 弘毅 (Takahashi, Hirotaka)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40419693

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：材料損傷検出や生体モニタリングの分野において用いられている適応型の時間-周波数解析の一つである Hilbert-Huang 変換と近年情報科学の分野においてキーテクノロジーとして注目されている機械学習を組み合わせて重力波データ解析に適用するための基本的なソフトウェアの開発・整備をおこなった。

特に、ブラックホール準固有振動や超新星爆発からの重力波の解析、および、ノイズ選別やノイズ低減の手法などが、うまく機能するかの検証を中心におこなった。

HHT 解析と機械学習を用いた手法が重力波解析に有効であることを示唆し、さらなる研究継続の必要性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発を進めた重力波解析手法は、適応時間周波数解析と機械学習を基盤としている。近年、機械学習やAIなどの情報技術は急速に発展し、重力波データ分析にこれらの最新の方法を適用する価値がある。

一方で、開発した適応型の信号処理と機械学習は、音声処理、画像処理、生体信号処理（心電図、筋電、EEGを含む）やスポーツなどの幅広い分野において、潜在的なアプリケーションがあると考えられる。そのため、本研究によって得られた知識は重力波データ解析の枠を超えて広範囲に影響を与える可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The algorithm based on Hilbert-Huang transform (HHT) analysis and machine learning has been developed as a method for time series analysis of nonlinear and nonstationary data, and it enables us to perform a high resolution time frequency analysis of signals with strong frequency modulation by evaluating the instantaneous variation of amplitude and frequency of data.

By using the developed method, we analyzed gravitational waves from black hole quasi normal mode and core collapse supernova, respectively. Moreover, the noise selection and noise reduction method based on machine learning was proposed.

We suggested that the analysis method based on the HHT and machine learning was also effective for gravitational wave analysis, and indicated the necessity of further research.

研究分野：重力波物理学・天文学

キーワード：重力波物理学・天文学 宇宙物理学 重力波データ解析 時間-周波数解析 機械学習

1. 研究開始当初の背景

2015年にAdvanced LIGOがブラックホール連星合体からの重力波GW150914およびGW151226を直接観測したことは記憶に新しい。その後や中性子星連星合体からの重力波も観測がされている。重力波天文学の創生を目的として、Advanced LIGO(米)とAdvanced Virgo(欧)、KAGRA(日)を中心に地上のレーザー干渉計重力波望遠鏡による国際観測ネットワークでの観測が進められている。

KAGRA等の重力波望遠鏡によって得られたデータから重力波の情報を取り出し、さらに、それを元に重力相互作用や天体現象に関する物理学的な研究を行うためには、大きなノイズが含まれる時系列データから微少な信号を取り出す手法の開発が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は、材料損傷検出や生体モニタリングの分野において用いられている固定された基底セットをデータに課さない適応型の時間-周波数解析の一つであり高い周波数分解能を実現するHilbert-Huang変換(HHT)と近年情報科学の分野で注目されているキーテクノロジーであり生命科学などの分野で取り入れられつつある機械学習(パターン認識や深層学習を含む)を組み合わせ重力波データ解析に適用し、新しいデータ解析工程の設計からコード開発、統計処理方法の研究を行う。

とにかく重力波天文学が本格的に展開されるまでは、試行錯誤の繰り返しが予想されるが、新しい視点で独創的なデータ解析法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

まず、本研究では、時系列データ解析法の一つであるHilbert-Huang変換(HHT)に注目した。HHTは、時系列データの解析手法の新しいアプローチであり、この変換は、固定された基底セットをデータに課さない適応型の時間-周波数分解を用いるため、フーリエ変換やウェーブレット変換などに比べ、高い周波数分解能をもつことが知られている。また、振幅や周波数の時間変動を瞬時的に解析することが可能になる。HHTの解析手順の概要を図1に示す。

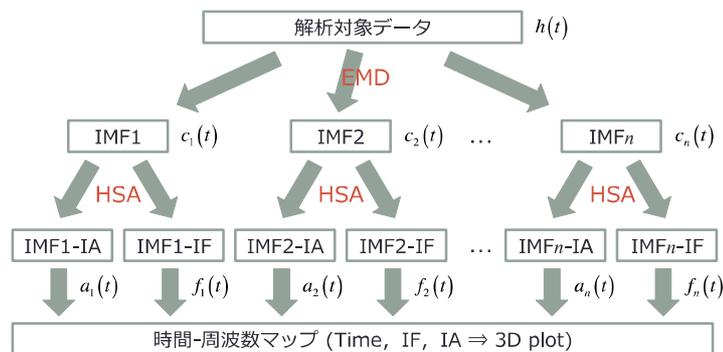


図1 : HHTの解析手順の概要

まず、解析対象とする時系列データに対して一種のハイパスフィルターである経験的モード分解(EMD : Empirical Mode Decomposition)を適用する。ここで、経験的モード分解により分解された複数の時系列データを固有モード関数(IMF : Intrinsic Mode Function)と呼ぶ。次に、それぞれの固有モード関数に対してHilbert変換を用いたHilbertスペクトル解析(HSA : Hilbert Spectral Analysis)を適用する。Hilbertスペクトル解析を適用することにより、それぞれの固有モード関数に関する瞬時振幅(IA : Instantaneous Amplitude)と瞬時周波数(IF : Instantaneous Frequency)を得ることができ、これらの瞬時振幅や瞬時周波数を詳細に解析することや、それぞれの固有モード関数から得られたすべての瞬時振幅や瞬時周波数より時間-周波数マップを描いて時間的変動を解析する。HHTを用いて、(1)リングダウン重力波、および、(2)超新星爆発からの重力波の解析を進めた。

さらに、研究代表者らのこれまでの研究から、複数のノイズの部分の瞬時振幅や瞬時周波数の振る舞いが異なることが明らかになっている。そのため、近年情報科学の分野で注目されているキーテクノロジーであり生命科学などの分野で取り入れられつつある機械学習(パターン認識や深層学習を含む)により、瞬時振幅と瞬時周波数の振る舞いを学習させることにより、(3)新たなノイズ選別手法の構築、および、(3)ノイズ低減の手法開発を進めた。

4. 研究成果

(1) リングダウン重力波

連星ブラックホール(BBH)の合体による重力波には合体後のブラックホール(BH)の準固有振動の成分が含まれることが知られている。特に、このBHの準固有振動には重力理論による違いが現れると考えられており、その周波数を解析することは有効かつ現実的だと考えられている。しかし、BBH重力波にける準固有振動の開始時刻は決定が困難であるため、準固有振動の正確な推定が難しい状況であった。そこで、適応型の時間-周波数解析手法である Hilbert-Huang 変換 (HHT) を用いた新しい準固有振動の開始時刻推定法を開発した。図 2 に、結果の 1 例を示す。図 2 中の灰色の部分、HHT を用いて推定した準固有振動の区間である。今後、日本の KAGRA の観測データの蓄積など、国際的な重力波観測ネットワークが発展して観測イベントが増えていく中で、本研究の成果によって重力波観測による一般相対論の検証や数値相対論の向上が期待できる。

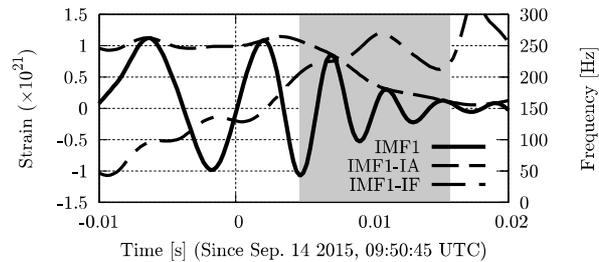


図 2: GW150914 の解析結果

(2) 超新星爆発からの重力波

今まで観測されている重力波はブラックホールや中性子星などのコンパクト星の合体によるものであったが、重力崩壊型超新星爆発からの重力波も今後観測されることが期待されている。そのため、数値シミュレーションによりその波形の計算がされている。この波形の特性を HHT を用いてより詳細に解析した。図 3 に短時間フーリエ変換による spectrogram の結果 (図 3(a)) と HHT による解析結果 (図 3(b)) の比較を示す。図 3 の結果からも HHT はより詳細に波形の特性を解析できていることがわかる。

短時間フーリエ変換やウェーブレット変換では観測データから特定できなかった特性を明らかにできる可能性があることを示唆した。

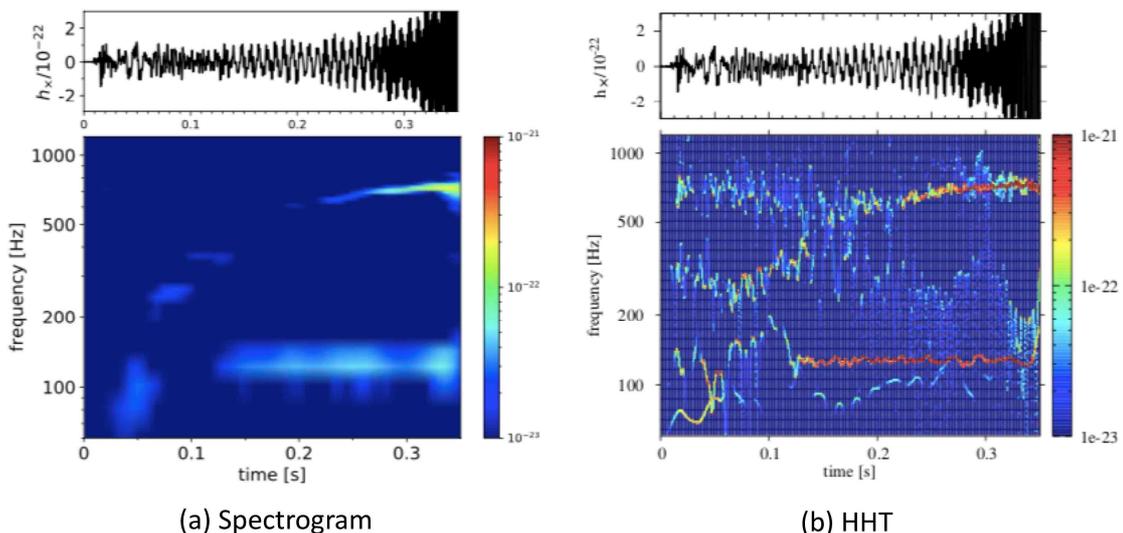


図 3: 重力崩壊型超新星爆発からの重力波波形の解析結果の 1 例。(a)は短時間フーリエ変換による spectrogram の結果。(b)は HHT による解析結果。

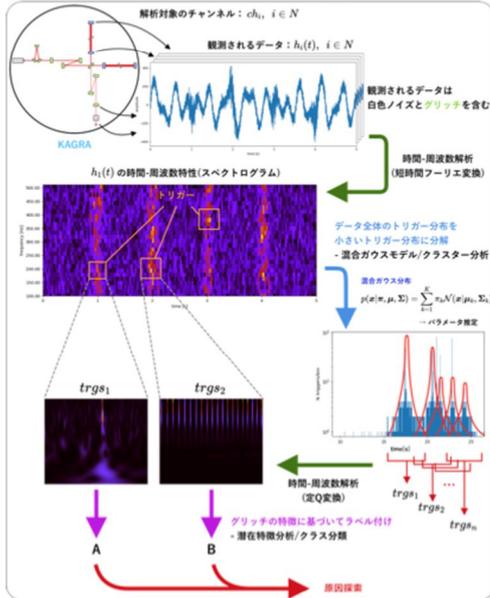
(3) ノイズ選別

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA において、外乱の影響で生じるグリッチノイズと呼ばれる突発性雑音の発生原因の探索は、重力波観測における感度向上にとって極めて重要である。時系列データ

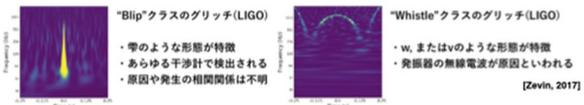
グリッチ解析の目的

- ・グリッチが発生するときのチャンネル間の影響を明らかにする
- ・各チャンネルで発生しやすいグリッチの種類を明らかにする
- ・同時に観測されやすいグリッチの種類を明らかにする
- ・グリッチの原因を推定する

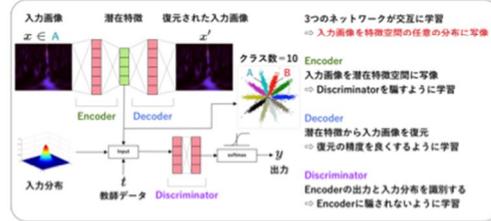
I. トリガー検出とグリッチ解析



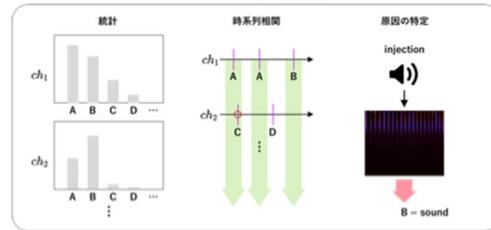
グリッチの大きさや継続時間、現れる周波数帯域、形態は多種多様



II. 敵対的自己符号化器を用いたグリッチの潜在特徴分析/クラス分類 [Alireza, 2015]



III. グリッチの原因探索



グリッチの原因や特性がわかれば...

- 干渉計からグリッチの原因を除去する/影響を削減するためのヒントになる
- グリッチとモデル化できない重力波を識別するためのヒントになる

[Zevin, 2017] Michael Zevin, Scott Coughlin, Sara Bahadri, Emre Besler, et al. "Gravity Spy: Integrating Advanced LIGO Detector Characterization, Machine Learning, and Citizen Science", CoRR, 2017.
 [Alireza, 2015] Alireza Mektzani, Jonathon Shlens, Navdeep Jaitly, Ian Goodfellow, Brendan Frey "Adversarial Autoencoders", CoRR, 2015.

ータからグリッチノイズを検出するための計算機的な試みは存在するが、検出したグリッチノイズからの原因の特定は人的資源に頼る部分が多い。そこで、深層学習を用いてグリッチノイズの発生原因を探索するための汎用的なフレームワークを構築をし(図4)そのテストを進めている。

図4: ノイズ選別 (機械学習を用いたグリッチノイズ解析) の概要

(4) ノイズ低減

超新星爆発から放射される重力波の観測データへの適用を前提とした Denoising Autoencoder によるノイズ除去の基礎的検討を開始した。Denoising Autoencoder とは、元のデータに人工的にノイズを加えたデータを入力として、元のデータを推定するように学習させたニューラル・ネットワークのことであり、音声認識における残響抑制や移動追跡システムにおける画像処理などに応用されている。本研究では、時系列データへの適用を目指し Denoising Autoencoder を設計した。

超新星爆発重力波のモデル信号に対してノイズの低減に成功しており、今後はより現実に近い状況での評価や性能向上に取り組んでいく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計33件（うち査読付論文 33件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 16件）

1. 著者名 KAGRA Collaboration	4. 巻 36
2. 論文標題 First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 165008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1361-6382/ab28a9	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 該当する

1. 著者名 Hiroyuki Nakano, Tatsuya Narikawa, Ken-ichi Oohara, Kazuki Sakai, Hisa-aki Shinkai, Hiroataka Takahashi, Takahiro Tanaka, Nami Uchikata, Shun Yamamoto, Takahiro S. Yamamoto	4. 巻 99
2. 論文標題 Comparison of various methods to extract ringdown frequency from gravitational wave data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124032-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.124032	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 Kazuki Sakai, Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hiroataka Takahashi	4. 巻 Vol.10 No.3
2. 論文標題 Probability Distributions of means of IA and IF for Gaussian noise and its application to an anomaly detection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances in Data Science and Adaptive Analysis	6. 最初と最後の頁 1850006-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S2424922X18500067	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68件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 33件）

1. 発表者名 高橋弘毅
2. 発表標題 データ駆動型科学の取り組み：重力波天文学から教育サポートまで
3. 学会等名 先端データサイエンス講演会，豊橋技術科学大学（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirotaka Takahashi
2. 発表標題 Status of KAGRA and KAGRA data analysis
3. 学会等名 The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG28), Rikkyo University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirotaka Takahashi
2. 発表標題 Application of the Hilbert-Huang transform to the data analysis of GW from CCSN
3. 学会等名 Towards Gravitational-Wave Astronomy of core-collapse SuperNovae (GWASNe2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 信号検出装置	発明者 秋月拓磨、章忠、高橋弘毅	権利者 豊橋技術科学大学、長岡技術科学大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-216833	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究分担者	秋月 拓磨 (Akiduki Takuma) (40632922)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教 (13904)	