

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	山本 貴宏
論文題目	New method of all-sky searches for continuous gravitational waves (連続重力波の新たな全天探索手法)		
(論文内容の要旨)			
<p>本学位論文は重力波観測データから連続重力波を抽出する新手法を提案するものである。連続重力波は (1) 観測時間よりも長い継続時間、(2) 非常に小さい周波数変動、(3) ほぼ一定の振幅、を持つ重力波の総称である。現時点では連続重力波は検出されていないが、重力波の理論によれば、回転する中性子星をはじめ、ブラックホール周りのアキシオン雲や極小質量のブラックホール連星などが連続重力波源として考えられている。一方で、連続重力波検出のためのデータ解析手法の開発は、今なお挑戦的な課題である。重力波解析の標準的な手法であるマッチドフィルタリングは、パラメータを少しずつ変えて生成した理論波形たちを観測データと相関をとることで検出やパラメータ推定を行う。連続重力波の波形は、検出器の運動に伴うドップラー効果によって位相変調を受ける。つまり理論波形は波源の方向に大きく依存する。電磁波観測などで波源の方向がわかっていない場合は、天球面上に格子点をはり、それぞれの格子点に対応する波形と観測データとの相関をそれぞれ計算しなくてはならない。そのため計算コストが増大し、年単位の長さを持つ重力波データを工夫なく相関解析をして全天探索することは現在の計算機の性能を持ってしても非常に困難である。現実の解析では観測データをいくつかの短い時間のデータに分割し、それぞれに対して計算した相関を適切に足し上げるという手法を用いている。この手法は計算コストの点では現実的な範囲に抑えることが可能であるが、検出能力が大幅に落ちるという欠点がある。近年、重力波データ解析に深層学習を応用する研究が盛んになっている。連星ブラックホール合体からの重力波の場合、マッチドフィルタと比較して2000倍から10000倍程度の計算速度で同程度の検出能力が実現できることが示されている。一方、連続重力波に適用した研究も存在するが、単純に観測データのフーリエ変換をニューラルネットワークの入力にただけでは性能が向上しないことが示唆されている。</p> <p>本論文では、適切に前処理を施した観測データに対して余剰パワー法と深層学習を適用する手法を提案し、その計算コストと検出性能を評価した。提案した手法では、まず観測データに前処理を施すことで、限られたデータ点のなかに信号を局在させることで、ノイズに対する信号のパワーをできるだけ大きくする。このように前処理したデータに対して余剰パワー法を用いて候補選択を行う。選ばれた候補に対してニューラルネットワークを用いて、波源の方向を絞り込む。このようにして制限されたパラメータ空間に対してのみマッチドフィルタを用いてフォローアップ解析を行うことで計算コストを大幅に下げる。本手法の性能を (1) 100%の稼働時間を持つ単一の検出器、(2) 定常ガウスノイズ、(3) 固定した偏光角・傾斜角・初期位相、(4) 波源の周波数変動を無視、という理想化された仮定の元で評価した。その結果、十分現実的な計算コストの範囲で年単位のデータを十分な検出性能で解析できることがわかった。例えば、完全に単色の重力波に限れば、1TFlops程度の計算資源であっても1年程度の計算時間を仮定すると、sensitivity depthの意味で90程度の性能が得られることがわかった。本研究の探索手法は連続重力波の新たな有用な検出手法となることが期待できる。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本学位論文では、重力波観測データから長期間の微弱な信号とモデルとの相関を取ることによって初めて検出可能となる連続重力波の新しいデータ解析手法についての提案がなされた。連続重力波の波源となる、回転する扁平な中性子星などに関するレビュー、および、重力波データ解析の基礎的な事項のレビューの後に、新しい解析手法の提案がなされている。

これまでに発見されているブラックホールや中性子星連星の合体からの重力波は短時間に信号が集中しているのに対して、連続重力波は信号が長期間の観測データに広く埋め込まれているために解析にかかる計算コストが莫大なものになる。長時間のデータと理論的な予想波形の相関解析をくまなく実行することは計算コストの観点で現実的ではない。これまでも連続重力波のデータ解析は行われているが最適化されたデータ解析手法が確立しているわけではなく、さらなる進展が見込まれる研究分野である。本学位論文では、信号雑音比を最大にするという観点ではもっとも有利なマッチドフィルタ解析をおこなうパラメータ領域を、より計算コストの小さい手法で制限することで、計算コストの増大を抑える新しい手法を提案している。新しい手法は時間リサンプリング法、短時間フーリエ変換、長期データの再フーリエ変換、余剰パワー抽出、畳み込みニューラルネットワークによる重力波源位置推定といったものを組み合わせた斬新なものである。地上重力波検出器のデータには地球の自転、および、公転の影響が重力波信号に含まれる。そのため、振動数の変化しない連続波であっても、単純にフーリエ変換をした場合多くの振動数ビンに信号が分散され、高い検出効率を望むことができない。そこで、これまでも機械学習を用いて候補となるパラメータを絞るというアイデアは提案されているが、それらはより単純な前処理の後に機械学習をおこなうものである。本学位論文では、地球の自転の効果をリサンプリング法により取り除き、短時間フーリエ変換で信号を単一の周波数ビンに局在させ、そのようにして得られた長時間の時系列データを再度フーリエ変換することにより、信号を抽出するという工夫をおこない、そのような前処理をおこなったものに対してニューラルネットワークを適用するというもので、これまでの手法とは一線を画する。疑似データを用いた検証実験で、長期間のデータからの信号検出効率と計算コストの点で本手法が優れている可能性が十分にあることが示された。

本研究で提案された手法を実際のデータ解析に適用するところまでは研究が到達していないため、現時点で他の解析手法との直接の比較は難しい。実際のデータ解析への適用のためには大型の重力波データ解析専用の計算機の利用を必要とする。そのことを踏まえると、手法確立の第一段階として、波源のパラメータの候補を推定する能力を本手法が十分に有しているという基礎を築いたことには十分な価値が見いだせる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成3年4月12日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。