

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04011

研究課題名（和文）機械学習を用いた突発天体検知サーベイロボットの構築

研究課題名（英文）Construction of a Transient Detection Survey Robot using Machine Learning

研究代表者

村田 勝寛（Murata, Katsuhiko）

京都大学・理学研究科・特定准教授

研究者番号：10735038

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）：既存の可視光望遠鏡に最先端の計算機科学技術を融合することで、観測画像から突発天体を迅速に検出するシステムを開発した。機械学習を用いた突発天体識別アルゴリズムにより、信号雑音比10以上の天体に対して、誤検出数を1夜あたり500回以下に抑えつつ、97%の精度で突発天体を検出できる性能を達成した。本システムを既存の完全自動のロボット望遠鏡のシステムに導入し、突発天体探査観測を実施した。さらに、広視野望遠鏡を新たに設置し、機能実証のための観測を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した突発天体検知システムを用いることで、大量の観測データから迅速に突発天体を発見することが期待できる。天文学に残された未開拓領域の一つである「突発天体现象」の理解には早期発見が重要であり、今後このシステムを用いて観測を続けることで、新たな天体现象の発見や、既存の現象のメカニズム解明に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：By integrating cutting-edge computer science technologies into existing optical telescopes, we have developed a system capable of rapidly detecting transient sources from observed images. The transient source identification algorithm, utilizing machine learning, achieves a detection accuracy of 97% for transient sources with a signal-to-noise ratio of 10 or higher, while limiting the false detection rate to 500 or fewer per night. This system has been implemented into our automated robotic telescope system and performed the observation of transient sources. Furthermore, a wide-field telescope has been newly installed to conduct observations for functional verification.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：突発天体検知

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大型望遠鏡が数多く建設されている現在にあって、天文学に残された未開拓領域の一つが、突然あらわれ短時間で消えてしまう「突発天体現象」である。この中でも最も観測難易度が高く、かつ科学的緊急性の高いターゲットが重力波現象である。これらの物理過程を理解するには、電磁波による観測が必須であるが、重力波による位置決定精度は低く、広大な予報天域の中から電磁波観測をおこない対応天体を迅速に同定する必要がある。そのため重要なのが大量の観測データから突発天体を迅速に自動検知するための技術であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、望遠鏡といった既存のハードウェアに最先端の計算機科学の技術を付加することで、リアルタイムの突発点体検知・通報を実現することである。具体的には(1)機械学習による突発天体識別技術の開発を行い、(2)画像演算装置(GPU)を用いた超高速データリダクションパイプラインと組み合わせることで、リアルタイム突発天体識別を実現し、(3)実際のロボット望遠鏡へ実装し、突発天体探査観測を実際に開始する。

3. 研究の方法

(1) 機械学習による突発天体識別技術の開発

光・近赤外線の突発天体探査を困難にする要因は、1平方度あたり数万個にもなる前景の恒星であり、過去の画像と現在の画像の差分画像をつくることで、定常天体を除去する手法が広く使われていた。しかし、差分画像に意図しない「引き残し」が残ってしまうため、突発天体検知を自動化するには至っていなかった。我々は畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いたCNN突発天体識別器を実用できるレベルへと完成させる。具体的には、参照画像にPan-STARRSのアーカイブを用い、北天のどこを観測しても、瞬時に突発天体を検知できるようにする。これは、クオリティが全く異なる画像の比較であり、従来の手法では実現できない。また、重力波や超新星など銀河に付随する現象を識別できるよう銀河近傍に現れた突発天体の識別精度を高めるべく、識別機の調整・改良を行う。

(2) リアルタイム突発天体識別の実現

CNN識別器に用いるGPUを、データリダクションへも活用できるようにする。我々はCuPyというCUDAのpythonラッパーを用いて独自にデータリダクションソフトウェアを開発し処理を30倍以上も高速化できる見通しを得ていた。本研究では、この解析ソフトウェアを各要素機能ごとに天文学で一般的に使われるソフトウェアIRAFとの整合性を検証し、学术论文に耐える信頼性を確保する。さらに、一連の一次処理をパイプライン化してCNN識別器と統合することで、リアルタイム突発天体識別パイプラインとして完成させる。

(3) ロボット望遠鏡への実装、広視野望遠鏡の開発・運用、及び、突発天体探査観測の開始 ロボット望遠鏡への実装と機能実証

突発天体識別パイプラインをMITSuME望遠鏡の処理系に置き換え、その機能検証を行う。検証に当たっては、変動天体のインジェクションが必要となるが、活動銀河核などの変動天体や移動天体を利用し、識別器の性能評価と機能改善を図る。同時にこれらは、重力波・超新星探査には除外対象となるため、突発天体を明確に見分ける必要がある。

機能実証用g'バンド広視野望遠鏡の開発・運用

識別器の開発と並行して、リアルタイム突発天体識別システムの機能実証用にg'バンド広視野望遠鏡を構築する。現在の重力波監視網は、理論予想から近赤外線に重点を置かれている。合体から10時間後のGW170817の青い放射が特異な例だったのかどうか検証する上でも、より早期の位置決めを実現する上でも、g'バンドの観測はユニークかつ有用である。もともとGRB追跡用に設計されたMITSuMEは視野が狭く、重力波イベントでの観測効率が低かったが、この広視野望遠鏡によって視野を20倍拡張し、2021年から始まる04の来たる中性子星連星合体イベントに備える。

スパコンへの実装とJ-GEMへのサービス開始

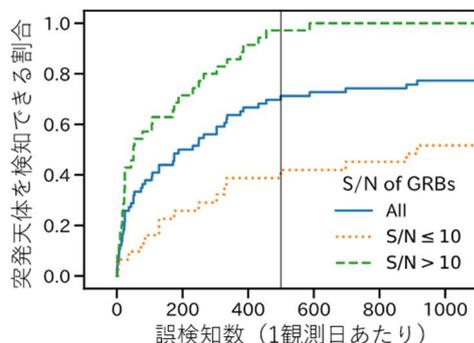
MITSuME望遠鏡とg'バンド広視野カメラでの検証が完了したのち、これらの処理パイプラインを東工大スパコンTSUBAME3.0へ移植し、日本の重力波追観測網であるJ-GEMチームへのサービス開始を目指す。現在、J-GEMで取得されたデータはすべて東工大に設置してある統合画像サーバーに集められ、当番が徹夜で監視している。これをスパコンへ移植し、人間の監視をCNN突発天体識別機に置き換える。

4. 研究成果

(1) 機械学習による突発天体識別技術の開発、及び、リアルタイム突発天体識別の実現

CNNを用いた突発天体の識別器は、現実的な観測状況を考慮し、突発天体の識別をおこなえるものを開発した。本研究前には、画像の中心に銀河があり、その周辺で発生した突発天体の識別にしか対応できない手法であったが、そのような制約を取り除き突発天体全般に対応できるように改良した。用意できる突発天体の観測画像が不足するため、実際の観測画像とそこらうつつて

いる定常天体から突発天体の疑似観測画像を作成し、CNNの学習に使用した。一般的な画像で学習済みのネットワークであるVGG (Simonyan 2014, arXiv:1409.1556)をもとに、天体画像で追加学習をすることで識別器を作成した。突発天体の疑似画像に対しては高い識別性能を示したが、この性能が実際の観測画像にも適用できるか検証が必要である。そのため、少数ではあるものの実際の観測画像での検証も行った。MITSuME 明野 50cm 望遠鏡で観測されたガンマ線バースト約20天体の実際の観測画像に適用して性能評価をおこなったところ、突発天体の信号雑音比が10以上の場合は誤検知数を1日あたり500回に抑えつつ突発天体を97%識別可能であることが分かった(右図、伊藤尚泰、東京工業大学 2022 年度修士論文)。開発した突発天体識別器とGPUを用いて高速化した観測画像のデータリダクションを組み込んだ突発天体検知システムを整備して、特定の天体の観測後に自動的に突発天体を検知するソフトウェアを実装した。



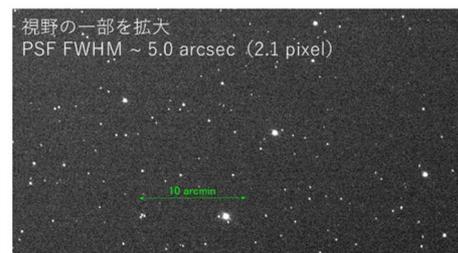
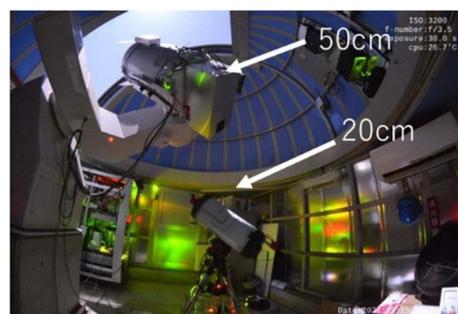
(2) ロボット望遠鏡への実装、広視野望遠鏡の開発・運用、及び、突発天体探査観測の開始

ロボット望遠鏡への実装と機能実証

MITSuME 明野 50 cm望遠鏡の観測画像に対して突発天体識別パイプラインを実装することで、観測から突発天体検知まで自動で行えるようにし、運用を開始した。加えて、突発天体と判定された画像を人間が目視で最終確認するためのWebアプリも整備した。

機能実証用 g'バンド広視野カメラの開発・運用

ソフトウェア、カメラの性能評価などを進め、国立天文台岡山分室に口径20cmの広視野望遠鏡を設置し自動観測を開始した(右図)。主要なターゲットである、中性子連星合体による重力波では、可視光では短波長側が先に増光することが期待されているため、可視光のSDSS g'バンドフィルターの使用を計画していたが、これに加えて、X線連星などの銀河面の赤い突発天体も観測するためにSDSS zバンドフィルターでも観測できるようにした。2台のアマチュア天文向けCMOSカメラの性能評価を進めて、実験室での試験と東工大屋上での試験観測により、このうち1台で天文研究向けの観測に必要な性能を備えていることを確認し観測を開始した。SDSS g'バンドフィルターでの試験観測をおこない、合計1000秒積分で17.5等の限界等級を達成していることを確認した。また、望遠鏡の赤道儀制御、CMOSカメラ撮像制御のソフトウェアを開発して、事前に準備した天体リストにもとづき自動観測を実施できる機能を導入した。



計画期間中に最重要ターゲットである重力波の光学対応天体の探査は行えなかったため、銀河系内の天体の観測を中心におこなった。フォーカス調整機構にやや問題があるものの、おおむね安定して自動観測を実施することが確認できた。我々が運用するMITSuME可視光望遠鏡のパイプラインを移植することで、広視野望遠鏡の画像処理と測光の自動化を実現したが、広視野望遠鏡画像での突発天体識別の実装は未達となった。可視光g', zバンドでの同時観測や重力波などの位置決定精度が悪い突発天体の天域探査を効率的に行うために、広視野望遠鏡2号機の設置準備を進めた。

スパコンへの実装とJ-GEMへのサービス開始

観測データ量が大きく処理速度が不十分になることを想定し東京工業大学のスパコンTSUBAMEへの移植も進めていたが、自前のGPU計算機を増設したため現時点では処理速度が十分だったため、スパコンでの運用は見送った。突発天体識別では、重力波発生後の観測画像と、重力波発生前に取得されたPan-STARRSプロジェクトの観測画像を比較するが、Pan-STARRSの画像ダウンロードが処理時間のボトルネックとなっていた。そこで、日本から観測できる全天域のPan-STARRSの画像を事前にすべてダウンロードし、座標指定で自動取得できるようにした。計画期間内に突発天体識別パイプラインは重力波追観測網J-GEMへのサービス開始には至らなかったが、画像自動取得システムをJ-GEMの本番環境に組み込みJ-GEMの追観測画像処理の高速化を実現した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤 尚泰, 村田 勝寛, 細川 稜平, 笹田 真人, 庭野 聖史, 谷津 陽一, 河合 誠之 (東工大理), 篠田 浩一, 井上 中順 (東工大情報理工), 伊藤 亮介 (美星天文台), 下川辺 隆史 (東大)
2. 発表標題 MITSuME望遠鏡画像に対する深層学習を用いた突発天体検知システムの構築
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋一郎 (東京工業大学), 東工大MITSuMEチーム
2. 発表標題 東京工業大学の 2022年度活動報告
3. 学会等名 第13回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤尚泰、村田勝寛、高橋一郎、細川稜平、笹田真人、庭野聖史、谷津陽一、河合誠之 (東工大理)、 篠田浩一、井上中順 (東工大情報理工)、伊藤亮介 (美星天文台)、下川辺隆史 (東大)
2. 発表標題 畳み込みニューラルネットワークを用いた MITSuME望遠鏡画像からの突発天体検知
3. 学会等名 第13回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤尚泰
2. 発表標題 深層学習を用いたMITSuME望遠鏡画像からの突発天体検知
3. 学会等名 第12回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井 優理
2. 発表標題 20cm 可視光望遠鏡 CMOS カメラの性能評価
3. 学会等名 第10回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 庭野聖史
2. 発表標題 GPU利用画像高速処理一次パイプライン
3. 学会等名 2020年度光赤天連シンポジウム「データ解析の新展開2020」
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 庭野聖史
2. 発表標題 GPUを用いた高速一次処理パイプライン(2)
3. 学会等名 第11回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ
4. 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0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
研究 分 担 者	谷津 陽一 (Yatsu Yoichi) (40447545)	東京工業大学・理学院・准教授 (12608)	

6. 研究組織（つづき）

	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	篠田 浩一 (Shinoda Kouichi) (10343097)	東京工業大学・情報理工学院・教授 (12608)	
研究分担者	井上 中順 (Inoue Nakamasa) (10733397)	東京工業大学・情報理工学院・准教授 (12608)	
研究分担者	下川辺 隆史 (Shimokawabe Takashi) (40636049)	東京大学・情報基盤センター・准教授 (12601)	

	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
研究協力者	河合 誠之 (Kawai Nobuyuki)		
研究協力者	笹田 真人 (Sasada Mahito) (10725352)	東京工業大学・科学技術創成研究院・特任助教 (12608)	
研究協力者	伊藤 亮介 (Itoh Ryosuke)		
研究協力者	伊藤 尚泰 (Ito Naohiro)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	今井 優理 (Imai Yuri)		
研究協力者	庭野 聖史 (Niwano Masafumi)		

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