

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01951

研究課題名（和文）スパースモデリングによるALMA望遠鏡イメージングの新展開

研究課題名（英文）New Imaging method for ALMA telescope with Sparse Modeling

研究代表者

池田 思朗（Ikeda, Shiro）

統計数理研究所・先端データサイエンス研究系・教授

研究者番号：30336101

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：国際プロジェクト、イベント・ホライゾン・テレスコープ(EHT)はM87楕円銀河と天の川銀河の中心にある巨大ブラックホールシャドウの画像を発表した。この撮像のために日本チームが中心となってスパースモデリングを用いた新たなイメージング法を開発した。本研究では、このアルゴリズムをチリにある高性能電波干渉計であるALMA望遠鏡のために、専用のソフトウェアとして作成し、公開することである。公開したアルゴリズムによって、天文学の成果をあげることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電波天文学において、電波干渉系は高解像度の画像を得る優れた観測手法である。観測データを画像に変換するにはイメージングと呼ばれる操作が必要であり、CLEANと呼ばれる方法が古くから使われていた。我々はALMA望遠鏡のために、近年提案されたスパースモデリングに基づく新たなイメージング法を実装し、ソフトウェアとして公開した。このあらたなイメージング法によって既存のALMA望遠鏡の画像の解像度を上げられると期待される。すでに新たな方法によって天文学の成果もあげている。

研究成果の概要（英文）：The international project, Event Horizon Telescope (EHT), released images of the super-massive black hole shadows at the centers of the M87 elliptical galaxy and the Milky Way galaxy. For this imaging, a Japanese team developed took a new imaging method based on sparse modeling. In the present project, we modified the sparse modeling based imaging algorithm for the high-performance radio interferometer, the ALMA telescope in Chile and released the software. Through collaboration, we obtained significant achievements in astronomy.

研究分野：統計学

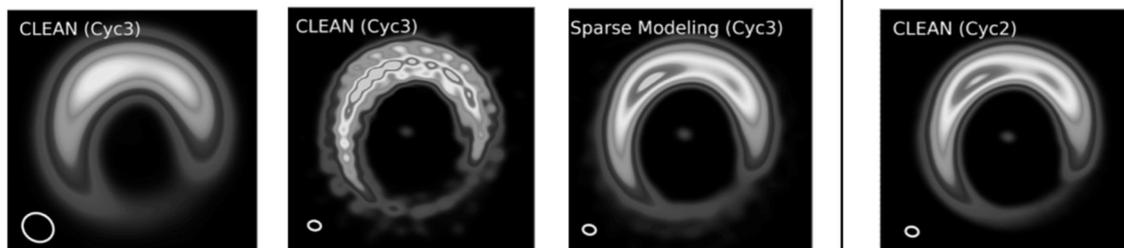
キーワード：ALMA望遠鏡 電波干渉計 イメージング スパースモデリング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2019年4月、Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration から M87 の超巨大ブラックホールシャドウの画像が発表された。この撮像には、申請者が共同で開発した新たなイメージング法 SMILI が用いられた。SMILI はデータ科学分野で研究されたスパースモデリングを電波干渉計イメージングに応用したものであり、EHT のデータ解析において CLEAN と同等以上の高い解像度の撮像結果を得た。この成功によって、スパースモデリングに基づく方法は新たな電波干渉計の主要なイメージング法のひとつとなることが期待されていた。山口らはスパースモデリングの方法を ALMA (Atacama Large Millimeter Array) のデータに用いることによって CLEAN 法に比べて三倍程度の解像度の向上が認められることを確かめていた (図 1) [1]。



(a) 短い基線のデータを CLEAN 法で解析。 (b) 合成ビームを小さくして左の解像度をあげたもの。 (c) 短い基線のデータを提案手法で解析。 (d) 約3倍長い基線のデータを CLEAN 法で解析。

図 1. 原始惑星系円盤 HD142527 のデータを CLEAN 法及び提案手法によって解析した結果。右端の図は左の3つに用いたデータに比べて約3倍長い基線のデータを用いているため、3倍高い解像度を得られる。提案手法(c)によって短い基線のデータから(d)と遜色のない結果を得た[1]。

2. 研究の目的

山口らの結果によって、スパースモデリングの方法が ALMA のデータに対しても有効であることは確認できたが、その際に用いたソフトウェアは効率の悪いものであった。このため、イメージングには非常に長い時間が必要であった。本研究では、スパースモデリングに基づく電波干渉計のイメージング法を ALMA のデータに適用するソフトウェア環境を構築することを目的としている。新しいイメージング方法を導入することによって解像度が上がるならば、望遠鏡の更新なしに新たな天文学的知見を得られることになる。

本研究では、データ科学者である池田がアルゴリズムを提案、実装し、分担者が天文データを用いた検証を行う。最終的に ALMA のイメージングの標準プラットフォームである CASA と親和性の高いソフトウェアとして電波天文学分野へ配布する。

3. 研究の方法

電波干渉計から画像を得るイメージングは、一般に不良設定問題となる。伝統的な CLEAN 法では、点源の集合として天体を表現し、貪欲法によって点源の位置と輝度を求め、最後に望遠鏡の配置によって決まる合成ビームを畳み込んで画像を求める。このため、合成ビームより細かい構造は捉えられない。一方、スパースモデリングは対象の事前知識を用いて逆問題を効率的に解く手法である。天体画像では輝度分布は0が多く(疎)、輝度が滑らかに変化するとして対象の画像を求めている。数理的には、正則化項付きの最尤法(Regularized Maximum Likelihood (RML))としてイメージングの問題を表現して解を求める。RML は合成ビームを必要とせず、直接的な解像度の制約はない。

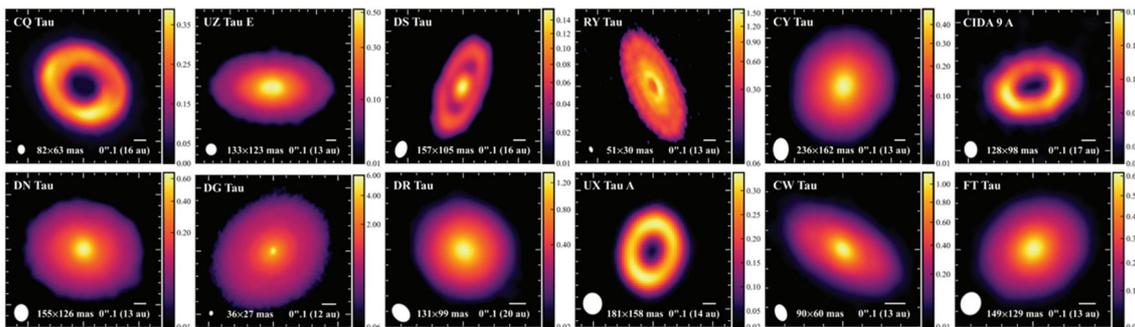
ALMA は基線が多いため、EHT に比べてデータの量が桁違いに多く、EHT のために開発したアルゴリズムの高速化が必須であった。アルゴリズムは池田が c++による実装を行い、FFT と並列化によって高速化を実現した。外注によって、ソフトウェアの速度解析をおこなった。インストールの効率化についても外注によって実現した。

上記は矯正済みのデータから画像を得るイメージングに関するソフトウェア開発に関する説明である。この他に、電波観測では、各望遠鏡のゲインの矯正という問題が存在する。電波干渉系では、得られた画像から望遠鏡のゲインを推定する自己矯正法(self-calibration)と呼ばれる方法が広くつかわれてきた。本研究ではこの self-calibration についても正則化項付きの最尤推定として定式化し、アルゴリズムを実装した。

4 . 研究成果

我々が開発したソフトウェアは、PRIISM という名前で公開し[2-3]、天文学者によってそのアルゴリズムの検証を行った[4]。ソフトウェアを用いた天文学的な成果も得られており、論文が発表された(図2)[5]。

(a) CLEAN 法の結果



(b) スパースモデリングに基づく PRIISM による結果

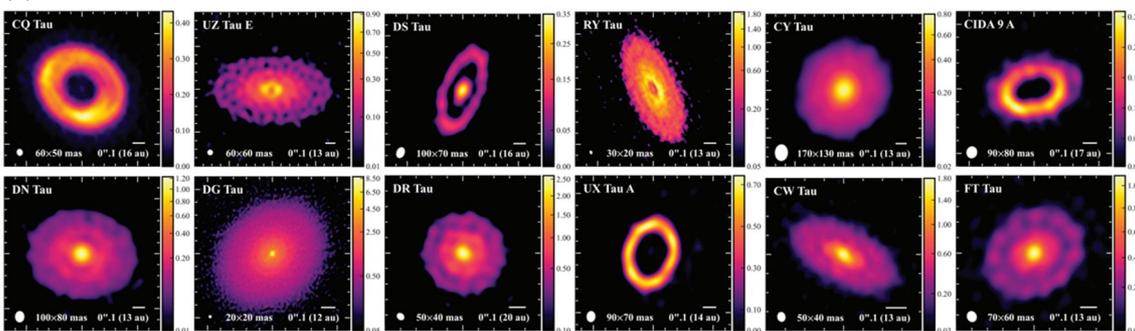


図 2. (a)CLEAN 法と(b)PRIISM による結果の比較。[5]の Fig.2, Fig.3 より一部抜粋。

データ科学の方法は最近急速に発展している。今後、こうした技術を天文学に積極的に導入すべきである。本研究の核心は、データ科学を電波天文学に導入することによって電波干渉計の撮像を新たな段階へと引き上げようという点である。本研究ではデータ科学者と天文学者が共同で新たな手法を開発、公開し、それによって天文学的な成果を得られている。

望遠鏡の矯正アルゴリズムである self-calibration に関しては、ALMA のデータを用いて提案方法の検証を行い、論文を提出した。現在、査読結果に基づき、論文改訂中である。

参考文献

- [1]. Yamaguchi, et al., “ Super-resolution Imaging of the Protoplanetary Disk HD 142527 Using Sparse Modeling, ” The Astrophysical Journal 895 (2), 84, 2020.
- [2]. 中里, 池田, 塚越, 谷口, 山口, 小杉, 本間, 川邊, 秋山, 「ALMA 向けイメージングツール PRIISM の開発 : (1) 」日本天文学会 2022 年秋季年会 .
- [3]. 池田, 中里, 塚越, 谷口, 山口, 小杉, 本間, 川邊, 秋山, 「ALMA 向けイメージングツール PRIISM の開発 : (2) 」日本天文学会 2022 年秋季年会 .
- [4]. 所司, 原田, 町田, 徳田, 山口, 中里, 塚越, 池田, 「スパースモデリング(SpM)を用いた超解像度画像解析の評価」日本天文学会 2023 年春期年会 .
- [5]. Yamaguchi, et al., “ ALMA 2D super-resolution imaging of Taurus-Auriga protoplanetary disks: Probing statistical properties of disk substructures, ” Publications of Astronomical Society of Japan, 76, psae022, 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamaguchi Masayuki, Muto Takayuki, Tsukagoshi Takashi, Nomura Hideko, Hirano Naomi, Nakazato Takeshi, Ikeda Shiro, Tamura Motohide, Kawabe Ryohei	4. 巻 76
2. 論文標題 ALMA 2D super-resolution imaging of Taurus? Auriga protoplanetary disks: Probing statistical properties of disk substructures	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 psae022, 38pp
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psae022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shiro Ikeda
2. 発表標題 Imaging of ALMA telescope with self-calibration
3. 学会等名 European Astronomical Society Annual Meeting 2023（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 所司歩夢、佐藤亜紗子、原田直人、町田正博、徳田一起、山口正行、中里剛、塚越崇、池田思朗
2. 発表標題 スパースモデリングを用いた星・惑星系形成領域のALMA超解像度画像解析
3. 学会等名 2023天文学会春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中里剛、池田思朗、塚越崇、谷口暁星、山口正行、小杉城治、本間希樹、川邊良平、秋山和徳
2. 発表標題 ALMA向けイメージングツールPRIISMの開発：(1)
3. 学会等名 2022天文学会秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田思朗、中里剛、塚越崇、谷口暁星、山口正行、小杉城治、本間希樹、川邊良平、秋山和徳
2. 発表標題 ALMA向けイメージングツールPRIISMの開発：(2)
3. 学会等名 2022天文学会秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田思朗
2. 発表標題 PRIISM: Imaging tool for ALMA telescope
3. 学会等名 BASP Frontiers conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池田思朗
2. 発表標題 Data science for future astronomy
3. 学会等名 東北大学天文学専攻談話会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田思朗
2. 発表標題 統計数理「イメージングのこれから」
3. 学会等名 SKA Japan ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川邊良平、山口正行、塚越崇、野村英子、中里剛、武藤恭之、池田思朗、松本倫明
2. 発表標題 へびつかい座円盤天体の超解像イメージング: II 円盤サブストラクチャー
3. 学会等名 2021年天文学会秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田思朗
2. 発表標題 Event Horizon Telescope Collaboration によるブラックホールシャドウ撮像とデータ科学
3. 学会等名 第44回情報理論とその応用シンポジウム SITA2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田思朗
2. 発表標題 天文学・物理計測におけるデータ科学
3. 学会等名 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田思朗
2. 発表標題 Challenges in imaging of ngVLA
3. 学会等名 ngVLA-J Development Days 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田思朗
2. 発表標題 Basic modern signal processing techniques and astronomy
3. 学会等名 東京大学天文学教室談話会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田思朗
2. 発表標題 Toward Astro Data Science
3. 学会等名 GALAXY EVOLUTION WORKSHOP 2021 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口正行、川邊良平、塚越崇、野村英子、中里剛、武藤恭之、池田思朗
2. 発表標題 Taurus Class II 原始惑星系円盤の ALMA 超解像サーベイ: I. 円盤の下部構造
3. 学会等名 2022天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笹田真人、福満翔、池田思朗、秋山和徳、森山小太郎
2. 発表標題 スパースモデリングによる VLBA の超解像画像におけるブレーザー 3C 454.3 ジェットの螺旋運動の発見
3. 学会等名 2022天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今村千博、田村陽一、谷口暁星、中里剛、池田思朗、山口正行
2. 発表標題 スパースモデリングによる $z = 7$ の Lyman break 銀河 A1689-zD1 の ALMA 超 解像イメージング
3. 学会等名 2022天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 戸上陽平, 田村陽一, 谷口暁星, 竹内努, Suchetha Cooray, 河野海, 中里剛, 池田思朗
2. 発表標題 サブミリ波超解像イメージングで空間分解した活動銀河 NGC1068 の中心核 構造
3. 学会等名 天文学会 2021年 春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeshi Nakazato, Shiro Ikeda, George Kosugi, Mareki Honma
2. 発表標題 PRIISM: Synthesis imaging tool based on the sparse modeling for radio astronomy
3. 学会等名 SPIE. Astronomical Telescopes + Instrumentation Digital Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田思朗
2. 発表標題 データ科学と天文学
3. 学会等名 「自然科学における階層と全体」シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田思朗
2. 発表標題 スパースモデリングと画像処理、天文観測を題材として
3. 学会等名 顕微鏡計測インフォマティクス研究部会 第2回研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田思朗
2. 発表標題 EHT によるブラックホールシャドウの撮像とデータ科学
3. 学会等名 日本物理学会（招待講演）
4. 発表年 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	田村 陽一 (Tamura Yoichi) (10608764)	名古屋大学・理学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	本間 希樹 (Honma Mareki) (20332166)	国立天文台・水沢VLBI観測所・教授 (62616)	
研究分担者	小杉 城治 (Kosugi George) (90290882)	国立天文台・天文データセンター・准教授 (62616)	

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
---------	---------