

アルマ望遠鏡のイメージング

池田思朗 数理・推論研究系 教授

共同研究者：中里剛(NAOJ), 塚越崇(足利大), 谷口暁星(名大), 山口正行(ASIAA), 小杉城治, 本間希樹, 川邊良平(NAOJ), 秋山和徳(MIT)

電波干渉計のイメージング

天文学において電波干渉計は、距離の離れた電波望遠鏡を組み合わせることで画像を得る方法である。最近 Event Horizon Telescope (EHT) 共同研究により公開されたブラックホールシャドウの画像[1]は、超長基線干渉計 (VLBI) で撮影されたもので、電波干渉計の優位性を示す例である。

電波干渉計では、データから画像を作る“イメージング”と呼ばれる手順が不可欠である。EHTでは、従来の方法に加えて正則化項付きの最尤推定法 RML(Regularized Maximum Likelihood)に基づくイメージング法を開発・使用した。RML法では、画像とデータの適合度を表す尤度の項と、疎性やなめらかさなどの画像の制約項をバランスさせて画像を推定する。EHTによってRML法の有効性が実証されたため、我々は現在、アタカマ高原にある大型電波干渉計、ALMA望遠鏡のイメージング用のRML法、PRIISM (Python module for Radio Interferometry Imaging with Sparse Modelling)を開発している。我々の目標は、ALMAのデータから自動的に良質な画像を推定するイメージングツールを提供することである。ALMAには約50台の望遠鏡が設置されているため、イメージング処理は計算量が多く、新たに導入したRML法のパラメータの選択を効率よく実行することが重要である。そこで、以下のようなRML方式を導入した。

$$\hat{x} = \arg \min_x \text{Cost}_\lambda(x) \quad \text{s.t.} \quad x, \lambda_1, \lambda_{\text{TSV}} \geq 0, \quad (1)$$

$$\text{Cost}_\lambda(x) = \sum_i \frac{1}{2\sigma_i^2} |v_i - \mathcal{F}_i(x)|^2 + \lambda_1 \|x\|_1 + \lambda_{\text{TSV}} \text{TSV}(x).$$

ここで v_i は観測されたフーリエ成分、 x は画像、 $\mathcal{F}_i(x)$ は x のフーリエ変換、また、 $\text{TSV}(x) = \sum_{ij} (x_{ij} - x_{i+1,j})^2 + (x_{ij} - x_{i,j+1})^2$ (Total Squared Variation) である。この問題は凸であり、non-uniform FFTを実装することによって効率的に解くことができる。画像パラメータ (λ_{a_1} と λ_{TSV}) の選択には Cross Validation に代わる評価基準を提案し、パラメータ選択にはベイズ最適化を用いることとした。

Self-Calibration

大気の影響により、地上の望遠鏡では利得(ゲイン)が時々刻々と変動する。電波干渉計では、ゲインの変動は画像に大きな影響を与えるため、データ処理によってゲイン変動を推定して低減する必要がある。この操作を self-calibration と呼ぶ。天球上に既知の天体があれば、その情報を使ってゲインを推定できる[3, 4]。しかし、参照する天体がなくてもゲインを推定できるに越したことはない。我々は、Repettiらの方法[4]を拡張し、PRIISMにself-calibrationを実装した。

従来の self-calibration の問題は以下のように表記される。

$$\{g_{\alpha}\} = \arg \min_{\{g_{\alpha}\}} \sum_{\alpha,l} \frac{1}{2\sigma_l^2} |v_l g_{\alpha} g_{\beta l}^* - \mathcal{F}_l(x)|^2, \quad (2)$$

ここで $g_{\alpha l}$ は時刻 l における局 α のゲインを表し(各フーリエ成分 v_l は2つの局から計算される)、 *st は複素共役を表す。画像 bm_x が固定されているとき、これは非凸な最適化問題である。ハイブリッドマッピング (Hybrid mapping) 法は、(1)式と(2)式を反復する方法である。自明な解 $g_{\alpha l} = 0, bm_x = 0$ を避けるために、何らかの制約のもとに解く必要がある。

提案する拡張では既知の天体を仮定せず、ゲインに対して滑らかに変化するという仮定を置き、(2)式に示す問題としてゲインを求める。

$$\{g_{\alpha l}\} = \arg \min_{\{g_{\alpha l}\}} \sum_{\alpha,l} \left[\frac{1}{2\sigma_l^2} |v_l g_{\alpha l} g_{\beta l}^* - \mathcal{F}_l(x)|^2 + \frac{\mu_1}{t_l - t_{l-1}} |g_{\alpha l} - g_{\alpha l-1}|^2 + \frac{\mu_2}{t_l - t_{l-1}} (|g_{\alpha l}| - |g_{\alpha l-1}|)^2 \right], \quad (3)$$

$$\text{s.t.}, \quad \mu_1, \mu_2 > 0, \quad \frac{1}{L_\alpha} \sum_l |g_{\alpha l}| = 1.$$

ここで目的関数の第2項と第3項は各望遠鏡のゲインが時間的に滑らかな変動をすることを要請しており、 μ_1 と μ_2 は滑らかさを調整する。最適化のアルゴリズムは [4] の方法を基にして実装した。

新たな方法による初期の結果

提案する self-calibration 法を実装し、(1)式ですでに提案した画像化方法と組み合わせ、ALMA望遠鏡によってすでに取得されて公開されているデータに対して適用した。

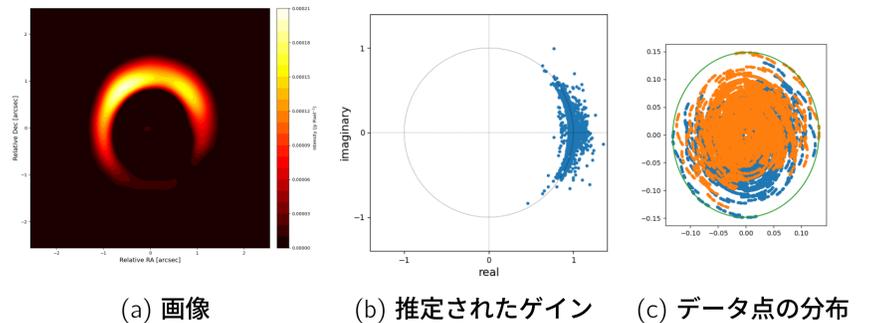


図 1: 原始惑星系円盤 HD142527 の結果。

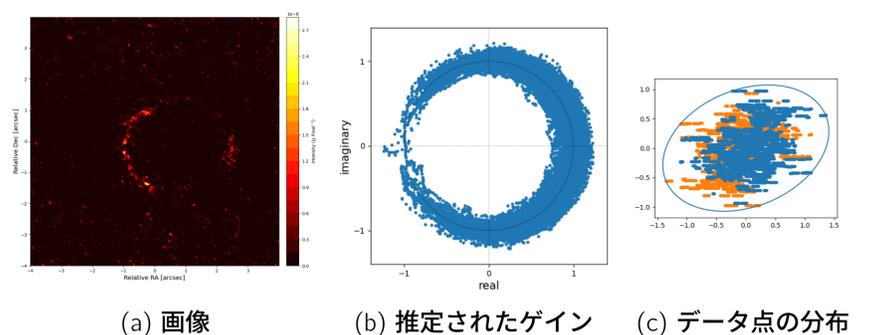


図 2: 重力レンズ銀河 SDP. 81 の結果。

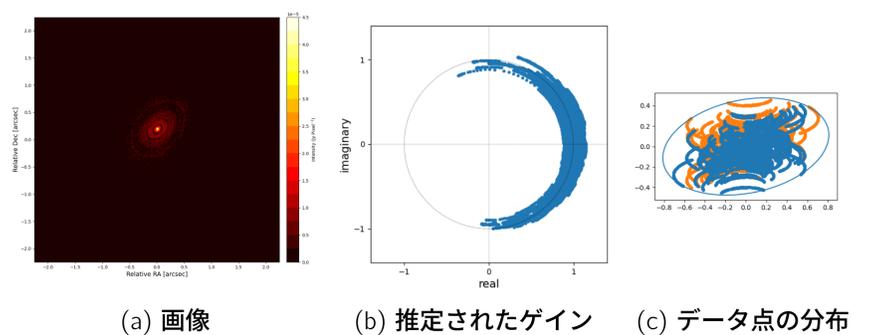


図 3: 原始惑星系円盤 HL Tauri の結果。

まとめ

現在、電波天文学では、天文学者の経験に基づき self-calibration を実行し、CLEAN法を適用して画像を得ています。我々の最終目標は、自動的にALMA望遠鏡のデータから画像を得る環境を提供することである。現在、式(1)を自動的に解くイメージング部分を実装し、PRIISM[2]として公開した。近い将来、self-calibration の部分についてもPRIISMのパッケージとして公開する予定である。

参考文献

- [1] EHT Collaboration, The Astrophysical Journal Letters 875 (1), L1, 2019
- [2] T. Nakazato, S. Ikeda, G. Kosugi, and M. Honma Proc. SPIE 11453, 114532V, 2020 <https://github.com/tnakazato/priism>
- [3] S. Salvini, S. J. Wijnholds, A&A, 571, A97, 2014
- [4] A. Repetti, J. Birdi, A. Arwa, Y. Wiaux, MNRAS, 470, 4, p.3981-4006, 2017