

多天体補償光学のためのトモグラフィック推定の広視野化

大野 良人 (東北大学大学院 理学研究科)

Abstract

我々のグループでは TMT の第 2 期装置として多天体補償光学 (MOAO) を検討している。MOAO は地上観測において大気揺らぎの影響を補正する補償光学を、広視野内の 10 個以上の天体に対して同時に適用させる次世代の新しい補償光学の 1 つである。MOAO では複数のガイド星の光の位相波面の測定し、その測定値からトモグラフィックの手法を用いて大気揺らぎの位相を高さごとに分解して推定するトモグラフィック推定という技術が重要である。現在 TMT で検討されている MOAO の視野は直径 5' となっているが、特に MOAO を用いた $z \sim 6$ 以上の Lyman Break Galaxy の静止系紫外線波長域の連続光スペクトルの多天体分光観測を実現するためには、天体数を稼ぐために直径 10' 以上の視野が必要であり、その視野に対応する広い領域の大気揺らぎを推定できるトモグラフィック推定の手法が求められる。

本研究では計算機上で多天体補償光学を再現するシミュレーションによるトモグラフィック推定の手法の開発と評価を進めており、直径 10' の視野内で精度良く大気揺らぎを推定するトモグラフィック推定の新しい手法を開発した。開発した手法では風速の情報から少し前の測定値が現在のどの領域の情報かを計算し、現在の測定値と少し前の測定値の両方を用いて推定を行うことで、用いる測定値を増やし、広い視野内で推定精度を向上させることができる。シミュレーションの結果、理想的な状況では今回開発した手法により直径 10' の視野で推定残差 250nm 以下 (ストレル比 0.6 以上 @Kband, Ensquared Energy $\sim 60\%$ 以上 in $0.05'' \times 0.05''$) という精度で推定できることがわかった。

1 Introduction

地上観測では、地球大気の影響により天体からの光の位相波面が乱され、その結果像がぼやけ、空間分解能が低下するという問題がある。補償光学はこの地球大気の影響をリアルタイムで補正し、望遠鏡の回折限界での空間分解能による観測を達成するシステムであり、地上の大型望遠鏡にとって必要不可欠なシステムである。一方で従来の補償光学は一度に補正できる視野が直径数十秒角と非常に狭いという制限もある。

この制限を打破するための次世代の補償光学として、直径 5' 以上の広い視野内にある 10 個以上の天体に対して同時に補償光学を適用する多天体補償光学 (MOAO) が考えられている。我々のグループではこの MOAO を 2020 年代に稼働が予定されている 30m 望遠鏡 (TMT) の第 2 期装置として実現し、TMT と MOAO の高い集光力・高分解能・多天体性を生かして遠方銀河の大規模な観測を行い、宇宙初期における銀河の形成や進化の過程を統計的に明らかにする

ことを目指している。

MOAO ではまず複数のレーザーガイド星の光の位相波面を波面センサーで測定し、その測定値からトモグラフィックの手法を用いて大気揺らぎの位相を高さごとに分解して推定する。これをトモグラフィック推定と呼ぶ。次にトモグラフィック推定による各高さの大気揺らぎの推定値から、天体方向の大気揺らぎの影響を計算する。次に可変形鏡の表面の形を計算した大気揺らぎの影響をキャンセルするような形に変形させ、変形した可変形鏡を通して天体を観測することで大気揺らぎの補正を行う。この一連の流れを図 1 に示す。可変形鏡による補正システムを複数用意することで多天体に対して同時に最適な補正を行う。

MOAO を用いた遠方銀河の多天体観測を行うためには MOAO の視野の広さが鍵となる。TMT の初期検討では MOAO の視野は直径 5' となっているが、特に数密度の低い $z \sim 6$ 以上の天体に対して多天体観測を行うためには、天体数を稼ぐためには直径 10' 以

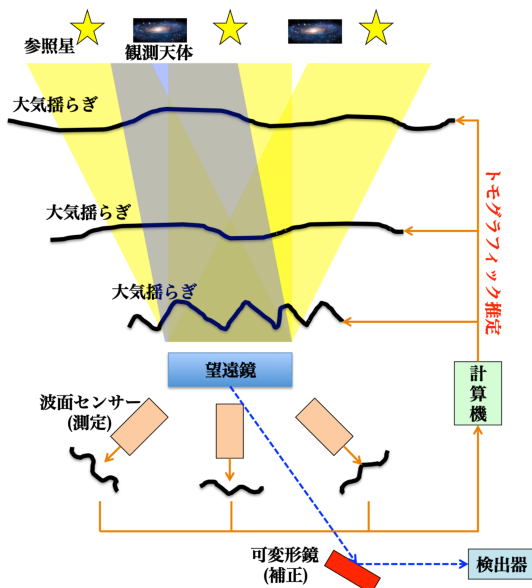


図 1: MOAO の模式図

上の視野が必要とされる。この直径 10' という広さの視野を達成するためには、その視野に対応する広い領域の大気揺らぎを推定するトモグラフィック推定の新しい手法が必要である。

トモグラフィック推定を広視野化するためには、広視野の大気揺らぎの情報を測定する必要がある。1つの手段はレーザーガイド星の数を増やすことだが、これは技術的・資金的困難が伴うため現実的ではない。そこで、本研究では従来用いられてきた [1] の推定手法に改良を加え、過去の測定値を現在の推定に反映させることで直径 10' という視野を達成する新しいトモグラフィック推定の手法を開発した。

2 Methods

2.1 トモグラフィック推定

トモグラフィック推定では大気揺らぎを複数の薄い層として考え、天体の光がこの層を通過するときに大気揺らぎの位相に応じた波面収差を受ける。大気揺らぎが層状に分布していることは観測的にサポートされている。まず、複数高さに分布する層上の離散的な点での大気揺らぎ位相値のベクトルを ϕ とする。次に複数波面センサー (今回は Shack Hartmann 波面センサー) の測定値のベクトルを s とすると、大

気揺らぎの位相点の値と波面センサーの測定値の関係は式 (1) のように書くことができる。

$$s = G\phi + \eta \quad (1)$$

ここで、 G は各高さの大気揺らぎと各波面センサーの測定値の間の関係行列であり、大気揺らぎの層の数や高さ・ガイド星の位置などが決まれば計算できる。 η は波面センサーの測定ノイズである。この式を ϕ について解くことで、複数の波面センサーの測定値から複数高さの大気揺らぎの位相を推定する。

しかし、Shack Hartmann 波面センサーでは測定できない高空間周波数な揺らぎ成分が存在する、推定する領域内に波面センサーで測定できない (つまり、どのガイド星の光も通過しない) 領域が存在することにより、式 (1) は単純には解けない。これらの問題に対処するために、今回は [1] の最小分散推定を用いて解く。最小分散推定では、まず $\phi_{est} = Rs$ となるような推定行列 R を計算する。ここで ϕ_{est} は大気揺らぎの位相の推定値である。このとき、 R は真値と推定値の分散が最小になるように、つまり、

$$\min_R \langle |\phi - \phi_{est}|^2 \rangle = \min_R \langle |\phi - Rs|^2 \rangle \quad (2)$$

を満たすように決める。式 (2) に式 (1) を代入して計算すると

$$R = (G^T G + \sigma C_{\phi\phi}^{-1})^{-1} G^T \quad (3)$$

となる。ここで波面センサーの測定ノイズはすべて独立な分散 σ を持つガウシアンノイズと考える。 $C_{\phi\phi}$ は大気揺らぎの共分散行列であり、大気揺らぎのパワースペクトルから計算される。[1] では離散的なラプラシアン行列 L により $C_{\phi\phi}^{-1} \approx cL^T L$ という近似を行う。 c は大気揺らぎの強さから決まる定数。これにより計算が単純になるとともに、行列が疎になり計算の高速化も達成される。本研究でもこの近似を用いる。

以上より

$$\phi_{est} = Rs = (G^T G + \sigma cL^T L)^{-1} G^T \quad (4)$$

を計算することでトモグラフィック推定が達成される。

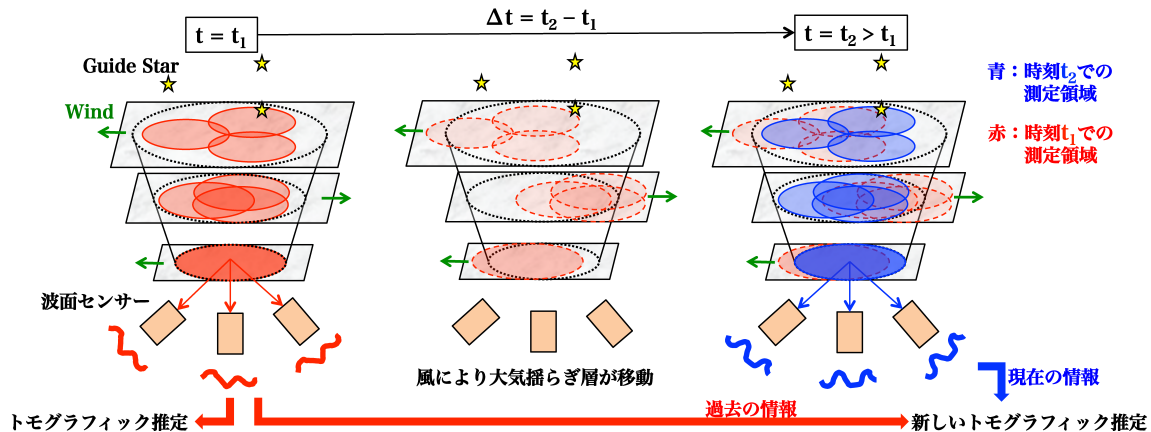


図 2: 開発した手法の説明。時刻 t_2 の推定では、 t_1 での測定値と t_2 での測定値の両方を用いることで情報を増やし、広視野で推定精度を向上させる。

2.2 新しいトモグラフィック推定の手法

図 2 は今回開発した新手法の流れを示した図である。まずある時間 t_1 でガイド星を測定する。このとき図 2 右の赤い領域の情報を得ることになり、この情報を基に推定を行う。そこから時間が経つと風により各大気揺らぎ層は移動し、それに伴い t_1 で測定した領域も移動する (図 2 中央)。リアルタイム補正を行うために Δt だけ経った時刻 t_2 に再び測定を行うと図 2 左の青い領域の情報を得ることになる。このとき、風速 v が分かっていたら t_1 の測定値が t_2 では $v\Delta t$ だけずれた図 2 左の赤い領域の情報であることが推定できる。よって、 t_2 での推定に t_2 での測定値と t_1 での測定値を用いることで、図 2 左の赤と青のより広い領域の情報から推定が行え、広視野で精度良く大気揺らぎを推定することができる。

解くべき式は $v\Delta t$ だけずれた図 2 左の赤い領域と大気揺らぎの位置関係から新しい再構成行列 $R(\Delta t)$ を作成し、 t_2 での $R(0) = R$ と連立させる。

$$\begin{aligned} \phi_{est}(t_2) &= \begin{bmatrix} R(0) & R(\Delta t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s(t_2) \\ s(t_1) \end{bmatrix} \\ &= R' s' \end{aligned} \quad (5)$$

3 Results

2 章で説明した手法を計算機上で MOAO を再現する観測シミュレーションにより評価を行った。シミュレーションの設定は口径 30m、大気揺らぎの強度は

マウナケア山頂の典型的な値 ($r_0 = 0.156m@500nm$ 、 $L_0 = 30m$)、8 個のレーザーガイド星、推定視野直径 $10'$ とした。準備する大気揺らぎモデルは TMT の seeing 観測から得られている 7 層のモデルを用いる。このモデルでは 0m の地上層が全体の 50%ほどのパワーを持つ。風速のモデルは [2] で示されているモデルを採用し、地上で 10m/s、12km くらいで最も強い 25m/s の風速を与える。今回のともグラフィック推定には大気揺らぎの層数や強度、風速の情報も推定する必要があるが、今回のシミュレーションではすべて既知である理想的な状況を考える。

図 3 は MOAO による補正度の視野内の各方向の位相波面残差のマップである。図 3 左は従来のトモグラフィック推定の手法を用いた結果、右は今回の新手法を用いた場合である。新手法では 0.1s 前の測定値を用いている (つまり、 $\Delta t = 0.1s$)。色が赤に近いほど残差が小さく推定精度が良いことを示しており、明らかに新手法を用いた方が視野全体で高精度な推定が行えている。

図 4 は図 3 の x 方向に沿って中心から $300''$ のプロフィールを切り出した図である。赤は従来の手法、他の色は新手法で Δt の値を変化させた場合の結果である。今回の状況では $\Delta t = 0.1s \sim 0.2s$ のとき最も精度の向上した。波面残差は 200nm 以下であり、これはストレル比 0.6 以上@Kband、Ensqared Energy $\sim 60\%$ 以上 (in $0.05'' \times 0.05''$) と対応する。 Δt が小さすぎると過去と現在の推定値がほぼ同じになってしまう精度の向上が少なくなり、逆に Δt が大きすぎると

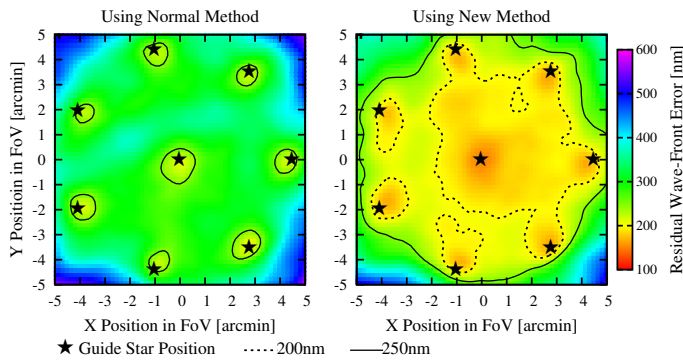


図 3: シミュレーション結果。MOAO で補正後の視野内の推定残差のマップ。黒い星はガイド星の方向を示している。左が従来の推定手法、右が新手法の結果である。

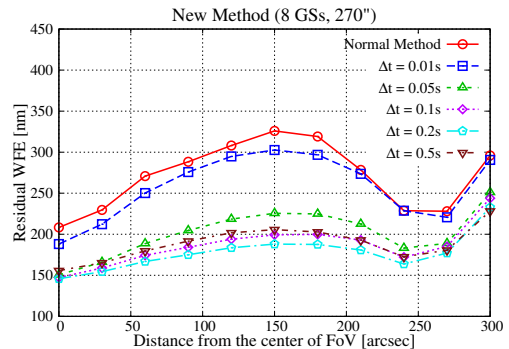


図 4: 図 3 の x 方向に沿って中心から 300'' のプロファイルを切り出した図である。赤は従来の手法、他の色は新手法で Δt の値を変化させた場合の結果

ぎると過去の測定領域が推定領域からはみ出してしまいうため精度向上が小さくなると考えられる。

4 Discussion

4.1 天体数の見積もり

図 3 の残差マップから、視野内で静止系紫外線波長域の連続光が検出できる $z \sim 6,7$ の Lyman Break Galaxy (LBG) の天体数を見積もる。LBG の数密度は [3][4] を参照した。波長分解能 $R=1000$ 、露出時間 10 時間、 $SN=10$ という条件で、従来の推定手法では 1~2 天体、新手法では約 12 天体を 1 度に検出できることがわかった。今回の結果は理想的な状況ではあるが、新手法によって 10 個以上の $z \sim 6,7$ の LBG に対して多天体分光観測が行えることが期待される。

4.2 風速や大気揺らぎの強度の推定

上述したように今回の結果は風速、大気揺らぎの強度が既知である理想的な状況での結果である。本手法を実現するためにはこれらのパラメータもリアルタイムで推定することが求められる。これらのパラメータの推定は本手法のみならず補償光学全体としても重要なことであり、すでに様々な方法が提案されている。特に [5] で提案された SLODAR という手法は複数の Shack Hartmann 波面センサーの測定値の相関情報から大気揺らぎの強度や風速を高さごとに推定することができる。今後はこの SLODAR の手法をシミュレーションに取り入れ、そこから推定

したパラメータを用いたトモグラフィック推定を行い、より現実的な推定精度の評価を行っていきたいと考えている。

5 Conclusion

今回 MOAO のトモグラフィック推定の広視野化を達成する新手法を開発し、数値シミュレーションにより精度評価を行った。今回は理想的な状況での結果ではあるが、従来の推定手法に比べて大幅な精度向上が達成できた。今回の新手法のシミュレーション結果から、視野内で静止系紫外線波長域の連続光が検出できる $z \sim 6,7$ の Lyman Break Galaxy (LBG) の天体数を見積もったところ、10 天体以上の LBG が検出できることが期待される。今後は本手法を実現するために必要な風速や大気揺らぎの強度の推定についても検討していく。

Reference

- [1] Ellerbroek, B. L., 2002., J. Opt. Soc. Am. A, 19, 1803-1816.
- [2] Hardy, J. W., 1998., New York: Oxford University Press.
- [3] Bouwens, R. J. et al, 2011, ApJ, 737, 90.
- [4] Bouwens, R. J. et al, 2012, ApJ, 752, L5.
- [5] Wilson R. W., 2002, MNRAS, 337, 103