

広視野補償光学のためのTomographyを用いた波面再構成

大野 良人, 秋山 正幸 (東北大学) @可視赤外線観測装置ワークショップ 2012/2/22,23

1. Abstract

広視野多天体補償光学(Multi Object Adaptive Optics, 以下MOAO)は、従来の補償光学よりも色視野での大気の影響の補正を可能にするシステムであり、次世代の超大型望遠鏡の装置として検討されている。このMOAOシステムを実現するためには、従来のAOとは異なる「Open Loop制御」と「Tomographyを用いた波面再構成」が必要不可欠である。現在、我々はこの二つのシステムの開発のために、「実験室におけるMOAOシステムの再現」と「望遠鏡を用いたOpen Loop制御の評価」を進めている。本発表では、MOAOシステムを再現するための光学系の紹介とTomographyを用いた波面再構成の簡単なSimulationの結果の紹介をする。

2. MOAO

Tomographyを用いた波面再構成

従来のAO

一つのGuide Star(以下GS)の測定から大気の情報を得る。その情報を用いて近くのTargetを補正する。そのため、GSとTargetが離れるとGapが生まれ、精度が悪くなる。

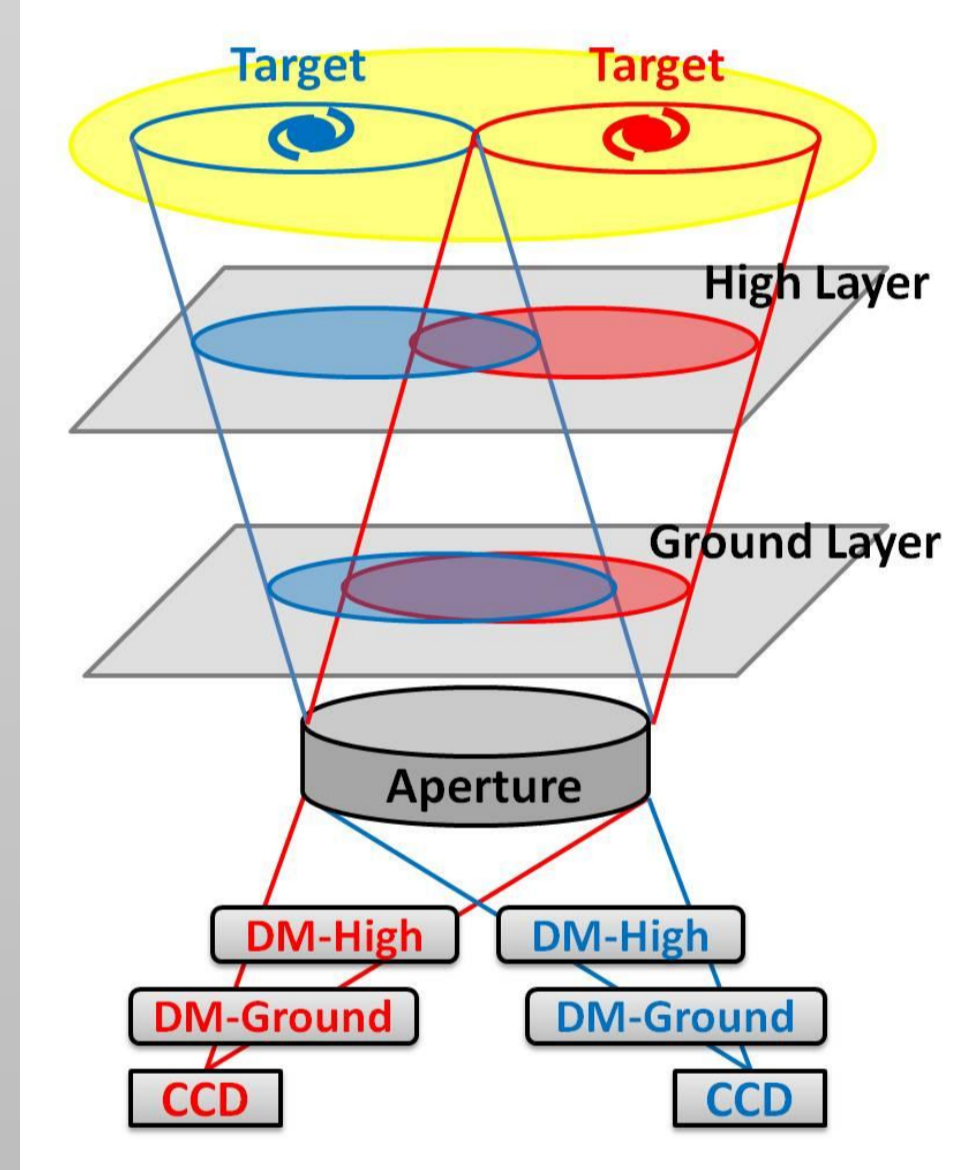
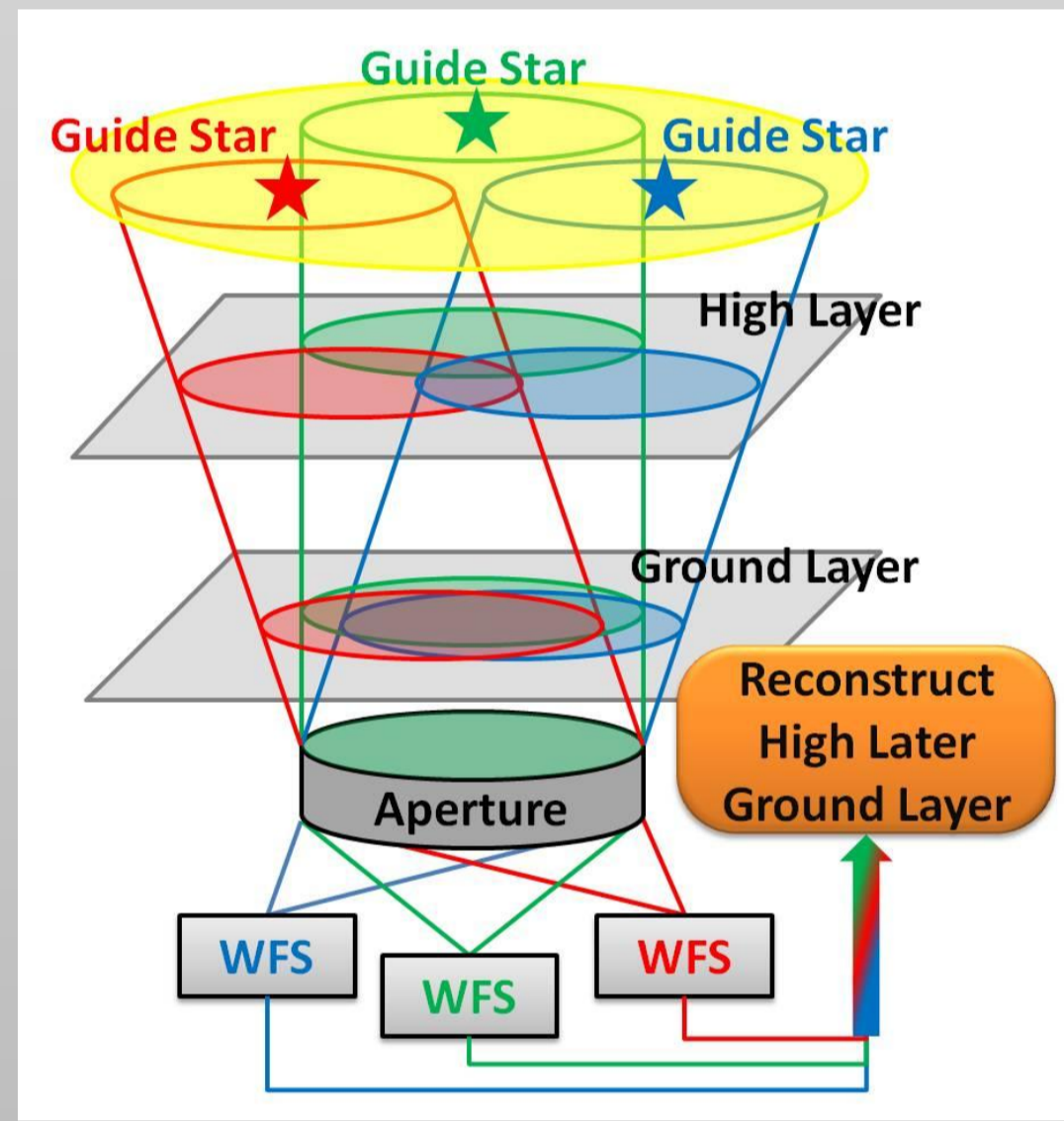
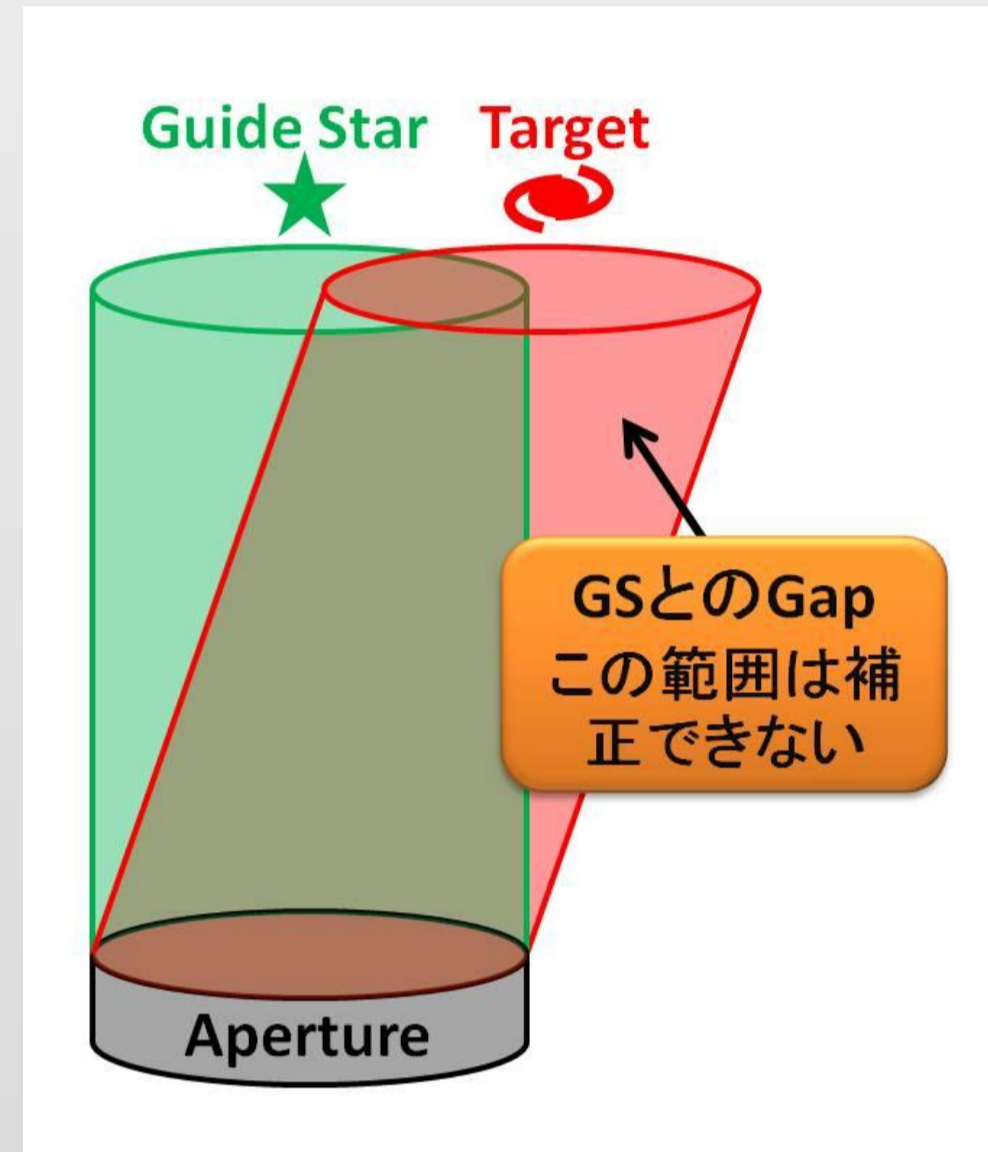
Isoplanatic angle

補正可能なGSからの角度
赤外で~数十秒角 (@マウナケア)

MOAO

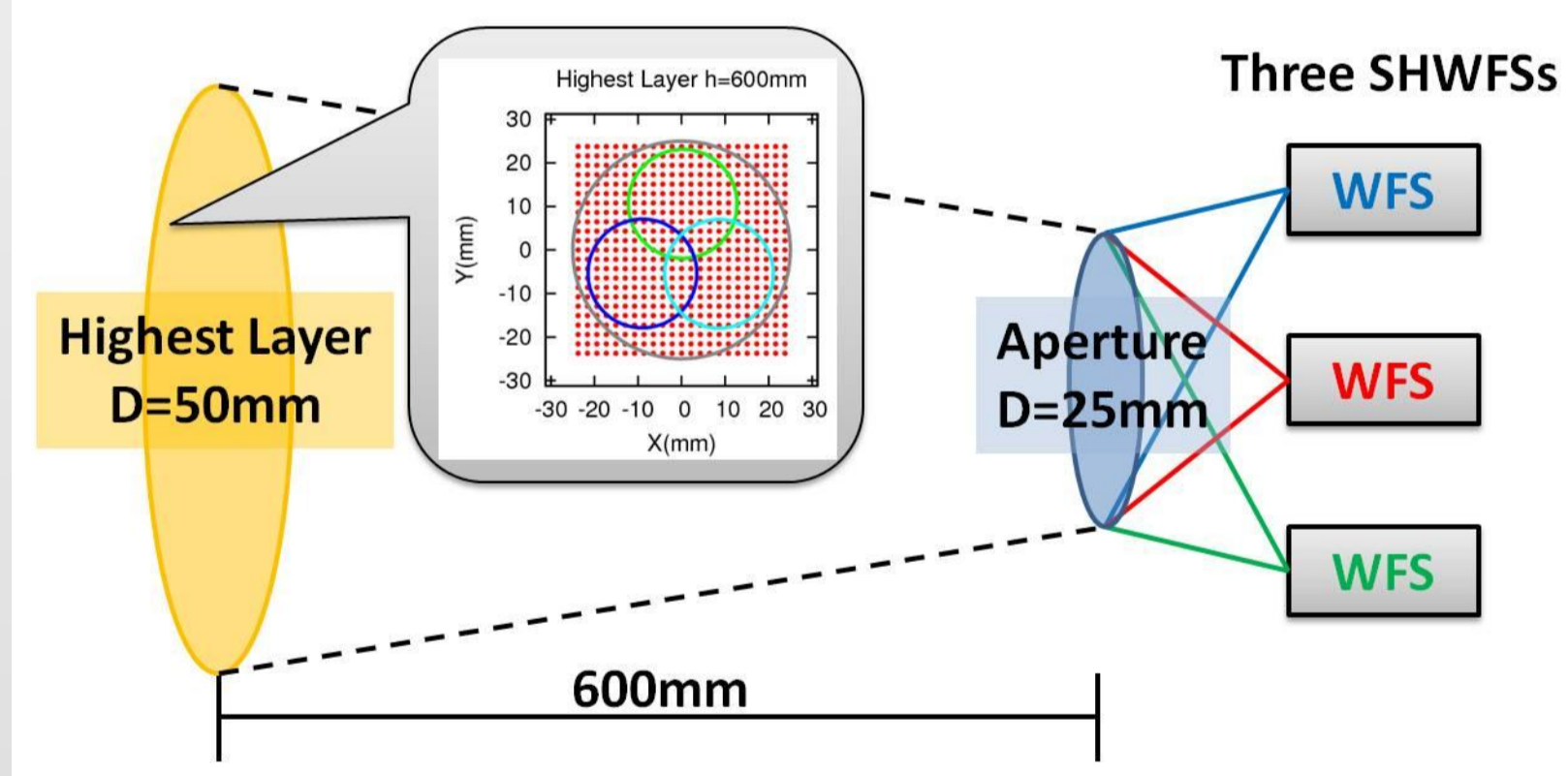
複数のGSの情報から、大気の情報Tomographyを用いて立体的に(複数の面として)再現する。

補正は、再現した情報をもとに、視野内の複数の天体それぞれに最適な補正を独立に行う。視野全体を補正するわけではない。



3. Algorithm

今回、実験室での再現に入る前に、複数のWFSの測定から複数の大気のLayerの形状を計算するSimulationを行った。設定は実験室の光学系に合わせた。



- GS、SHWFSは3つ。Highest Layer上での各GSの位置は (X[mm], Y[mm]) = (0.27, 10.60) (-8.99, -5.41) (8.61, -5.49) ← 測定値
- 今回はZernike modeを大気の波面として与える。また、各Layerの重みは等しいとする。
- 測定のノイズは今回は考慮していない。
- WFSの点の間隔は、Layerの点の間隔の半分の細かさとする。

AlgorithmはEllerbroek et al. (2002)を参考にした。

$$S_{WFS} = G_{WFS} W_{WFS} + n$$

WFSの測定値とWFS上での波面の関係(nは測定誤差)

$$W_{WFS} = A_{WFS}^{Layer} W_{Layer}$$

Layer上の波面とWFS上の波面の関係(今回は線形補間を用いた)

上の関係をすべてのWFS、Layerについて考えると

$$\begin{bmatrix} S_{WFS1} \\ S_{WFS2} \\ S_{WFS3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{WFS1} & G_{WFS2} & G_{WFS3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{WFS1}^{Layer1} & A_{WFS1}^{Layer2} \\ A_{WFS2}^{Layer1} & A_{WFS2}^{Layer2} \\ A_{WFS3}^{Layer1} & A_{WFS3}^{Layer2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{Layer1} \\ W_{Layer2} \end{bmatrix} + n$$

測定値 求める波面

このままこの式を解くと解けない。GSで測定されない領域があるため。Layer上で測定されない点は、Kolmogorovのポワースペクトルを近似的に導入することでまわりの測定値を外装するように

4. Simulation

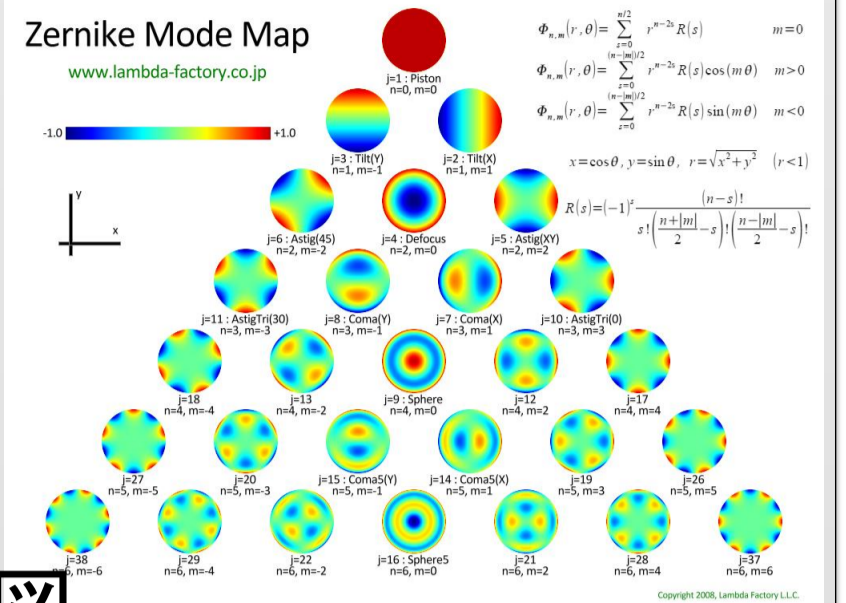
今回のSimulationでモデル波面として各大気のLayerにZernike Modeの波面を与える。与えるZernikeの係数 a_j はすべて1とする。与えた波面のRMSと推定した波面を引いたときのRMSをLayerごとに比較することで評価を行う。

$$RMS_{ref} = \begin{cases} \frac{a_j}{\sqrt{n+1}} = (n+1)^{-1/2} & (m=0) \\ \frac{a_j}{\sqrt{2(n+1)}} = \{2(n+1)\}^{-1/2} & (m \neq 0) \end{cases}$$

与えたZernikeのRMS(n,mは次数)

$$RMS_{dif} = \sqrt{\frac{\sum (W_{ref} - W_{est})^2}{n}}$$

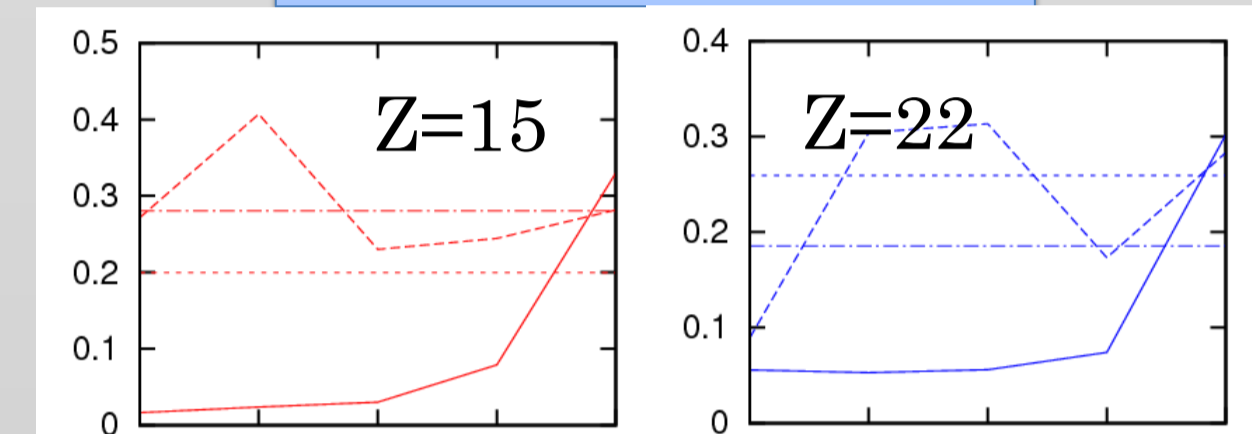
推定した波面との残差(擬似的な補正)



また、視野内での推定の精度の違いを見るために、右の図のような中心から半径の0.2の間隔の円環内でのRMSの比較も行う。

横軸:r/R 縦軸:RMS
— RMS_{dif}(r/R) - - - RMS_{ref}(r/R)
..... RMS_{dif}(ALL) - · - · RMS_{ref}(ALL)

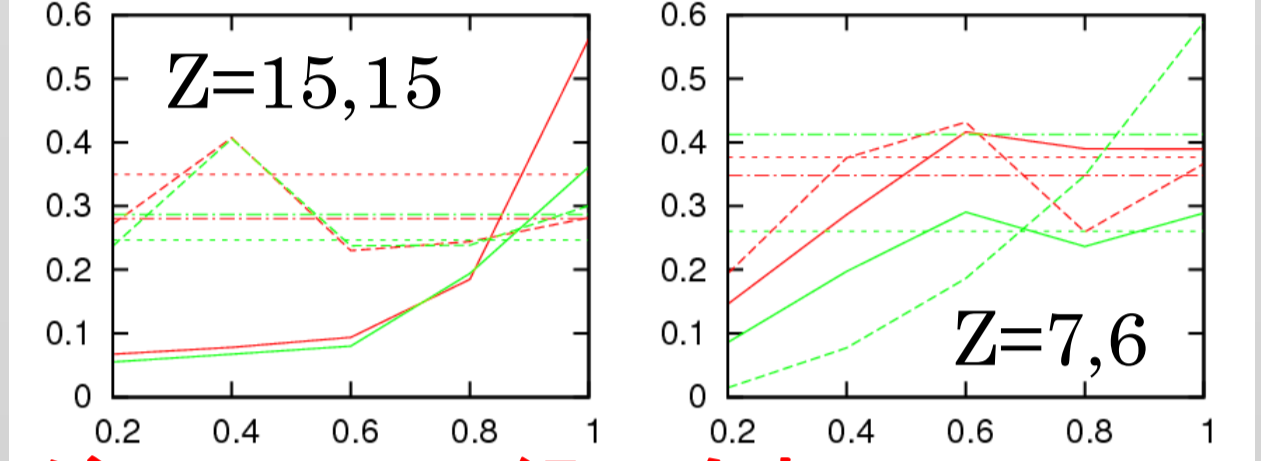
Layerが1枚のとき



GSがカバーしていない外側の精度が悪く、全体としても悪くなる。

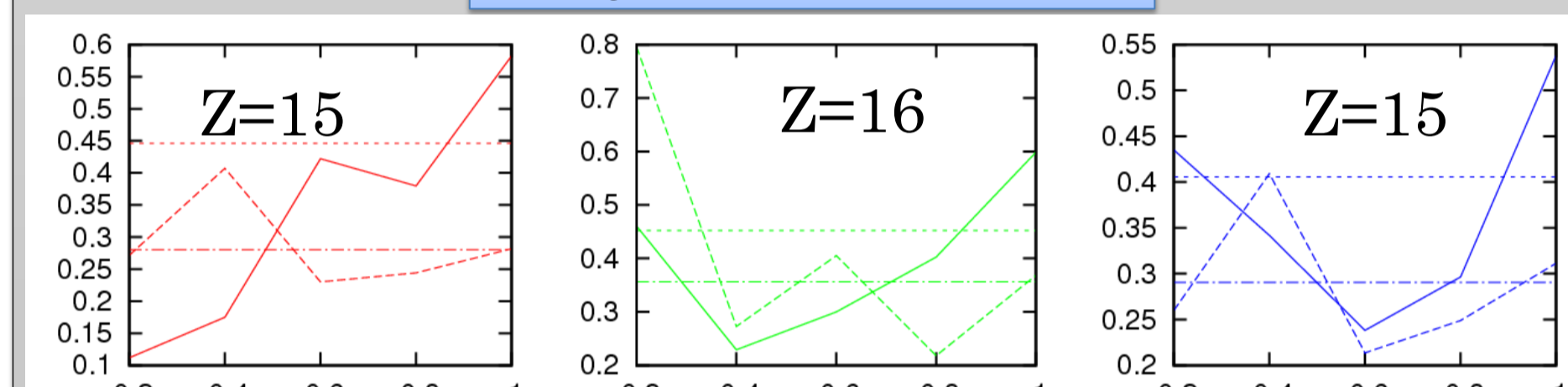
Layerが2枚のとき

Layer1=600mm, Layer2=300mm



精度がZernikeの組み合わせに依存。内側の方が精度がいい。

Layerが3枚のとき



Layer1 600mm Layer2 400mm Layer3 200mm
Layerが低くなるにつれ悪化。やはり外側が悪い。

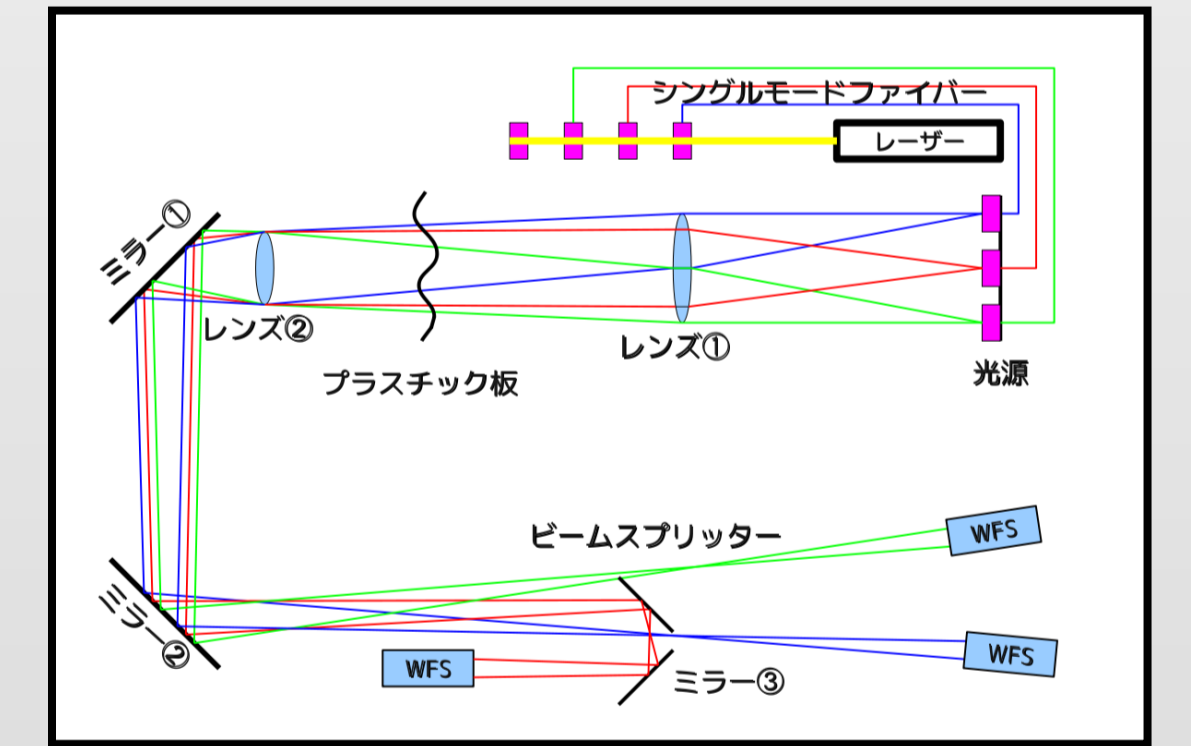
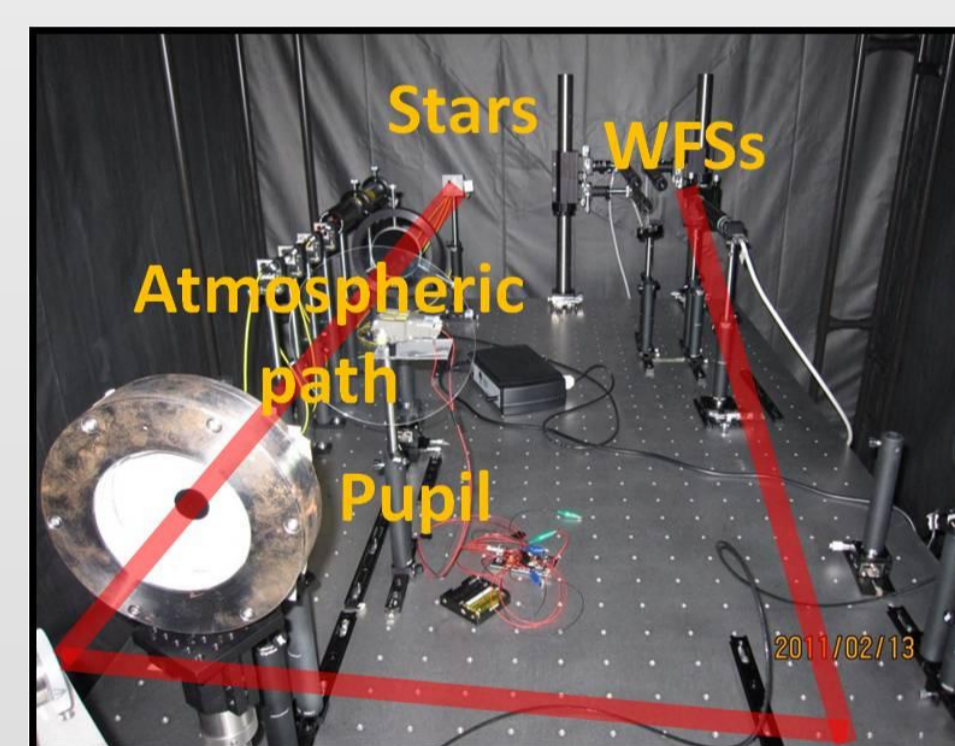
Layerが4枚以上のとき

枚数が多くなることで他のLayerの影響が大きくなる。さらにLayer間の距離も近づくのでさらに精度が悪くなる。一番高いLayerが一番精度がよかった。

まとめ: Layerを多くするほど、他のLayerの影響で再構成の精度が悪くなる。また、GSがカバーしていない範囲はLayerの数に限らず悪い。Zernikeの組み合わせにかなり依存しているので、Layerごとにパワーを変えた現実的な大気モデルが必要である。

5. Experiment

MOAOを再現する光学系と、現状について紹介する。



暗室内に組み立てた光学系(上図)。レーザーの光をシングルモードファイバーで4分割することで4つの星(3つのGS, 1つのTarget)を再現。3つのGSからの光で見積もった波面と、Targetの光から直接計算した波面を比べることで、システムの評価を行う。

大気揺らぎの再現

プラスチック板
実際にプラスチック板のみの場合で、再構成の評価を行った。
※Tomographyは使用していない

Target

Estimate

Difference

GSの情報からTargetの情報を再構成できている

透過型LCD空間光変調器 LC2002

Holoeye Photonics AG
入力した画像の位相差を作る液晶式の変調器

Input WFSでの測定結果

位相板 (Lexitek)

TMT@マウナケアの大気揺らぎを想定して作ってある。
100mmφ

6. Future Work

◎Simulationの大気として、より現実的なモデルを用いる。◎ノイズを加えて評価する。◎アルゴリズムの改良。◎実験室でのTomographyの再現。