



# 広視野多天体補償光学のための 波面再構成

第二回可視赤外線観測装置技術ワークショップ  
2012/12/17

東北大学  
大野良人、秋山正幸

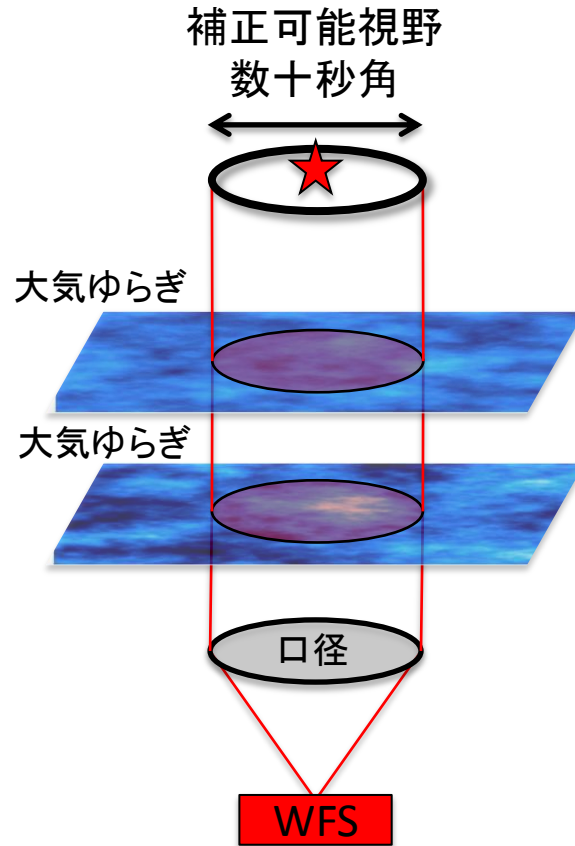
# はじめに

- 次世代超大型地上望遠鏡の装置として、**広視野多天体補償光学 (Multi Object Adaptive Optics, MOAO)**を検討している。
- 本発表では、広視野の補正に使用する大気揺らぎの推定方法について離します。
- 今回はシミュレーションによって大気ゆらぎの推定精度、計算速度について検討した。



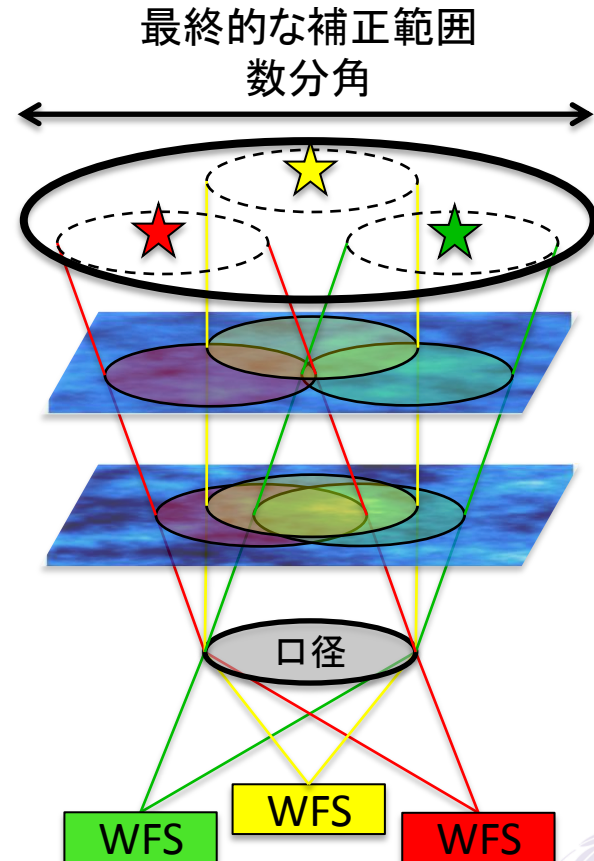
# 広視野補償光学

## 1つガイド星の補償光学



推定できるのはガイド星方向の大気揺らぎの積分値

## 広視野補償光学



複数のガイド星を用いることで広視野の大気を高さで分解して推定する

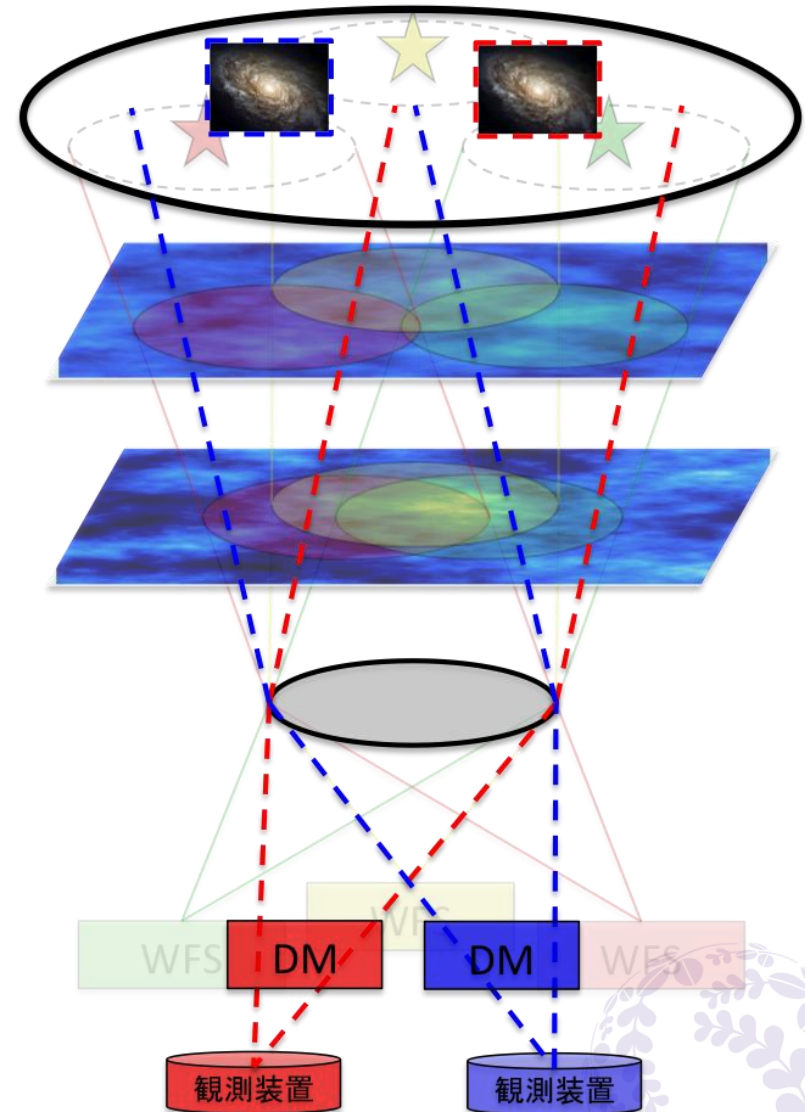
# 多天体補償光学

複数のガイド星の情報から推定した広視野の大気情報から、視野内の各天体方向に最適な補正を天体ごとに行う。

## 課題

- 大気を立体的に推定するために**トモグラフィ**の技術が必要。
- 計算量が増加するが、リアルタイム補正を行うためには**計算の高速化**が必要。
- 測定方向と補正方向が異なるので、**オープンループ制御**が必要。(高精度な推定)

**高速かつ正確な推定が必要！！！！**



# トモグラフィック波面再構成

- トモグラフィック波面再構成は最小分散推定で行う(Ellerbroek, 2002)。

$$(G^T G + \sigma C_\phi) X = G^T S$$

ノイズから決まる重み

求める大気揺らぎ

測定値

大気揺らぎと測定値の関係を表す行列

大気揺らぎの共分散行列  
コロモゴロフのパワースペクトルを仮定

- 共役勾配法を用いて反復的に解いていく。
- 計算にはGPGPUによる並列計算を組み込む。  
(行列演算のパッケージ「CUSPARSE」、「CUBLAS」を用いた。)
- 共役勾配法は行列とベクトルのかけ算の繰り返しなので並列計算と相性が高い。
- 使用したGPGPUはTesla C2070、CUDAのVersionは3.2



# 計算の設定

- 望遠鏡の口径 30m
- 波面センサーのピッチ 0.5m Keck望遠鏡と同じ
- ガイド星 Na LGS (92km)
- 推定する大気の位相点の間隔  $0.25\text{m} < 4000\text{m}$ 、 $0.5\text{m} \geq 4000\text{m}$
- 大気モデルの位相点の間隔 0.05m
- アウトースケール 30m
- 計算する視野 直径600arcsec (高度10kmで約45m)
- 大気揺らぎの強さ  $r_0=0.156\text{m}$  (@500nm) マウナケア山頂での典型的な値
- 観測波長  $\lambda=2200\text{nm}$  (Kバンド)
- 大気モデル TMTのサイト調査で得られた値を使用。

高度	0m	500m	1000m	2000m	4000m	8000m	16000m
相対的な強度	0.5960	0.0963	0.0325	0.0372	0.0869	0.0684	0.0826

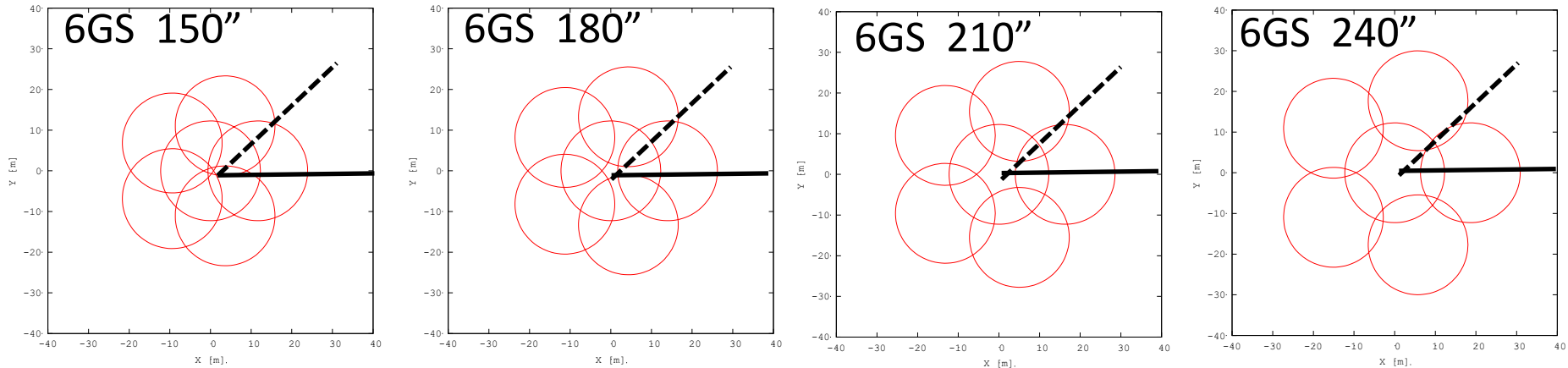
地表層が約60%を占める

- 精度の目標値 Kバンドでストレル比~0.4以上
- 目標視野 直径5'以上
- 速度の目標値 1kHz



# ガイド星の配置

- ガイド星が6個の場合
- ガイド星の配置は視野中心に一つ、残りのガイド星を正五角形に配置する。
- 5つのガイド星の中心からの距離は150"、180"、210"、240"の4パターン。
- 下の図は高度16000mでのガイド星のパス



以後、上の図の黒線方向の推定精度について見ていく

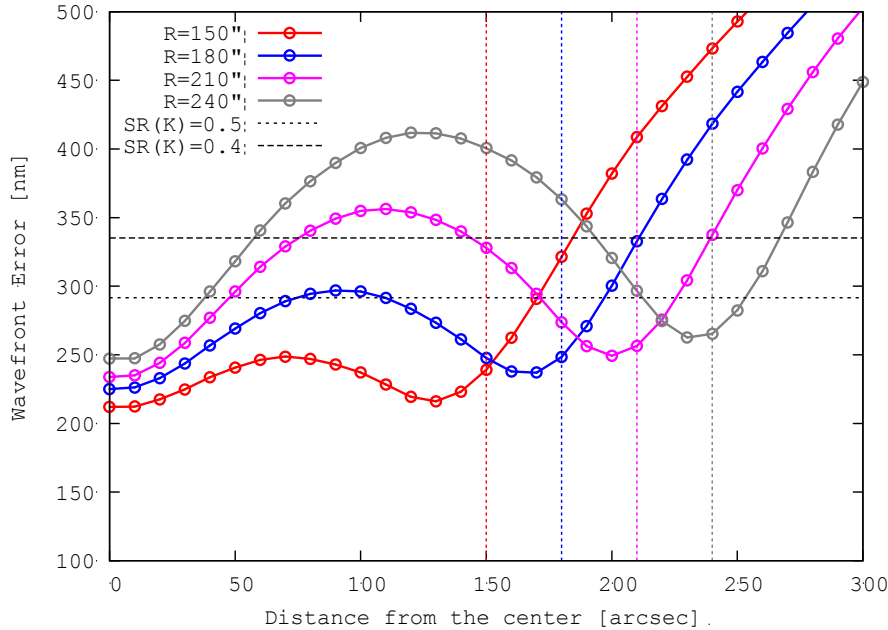
———— ①ガイド星を通る方向

----- ②ガイド星とガイド星の間を通る方向

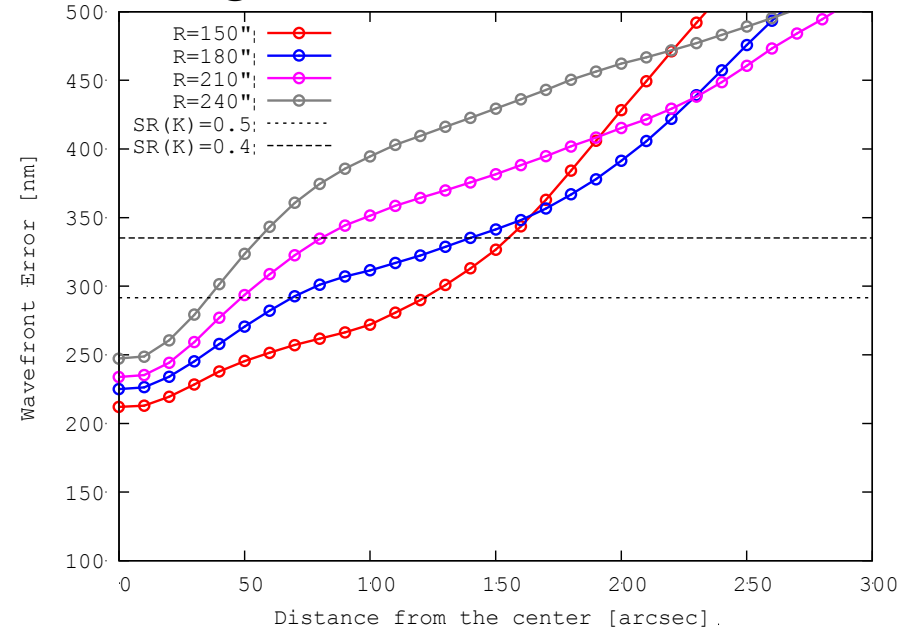


# シミュレーション①

①ガイド星と重なる方向



②ガイド星とガイド星の間の方向



横軸：視野中心からの距離      縦軸：波面誤差      色：ガイド星の距離

- KバンドでSR $\sim$ 0.4を考えると6GSの場合の補正可能視野は5'~7'(青)。
- 計算時間は**100秒~150秒**。

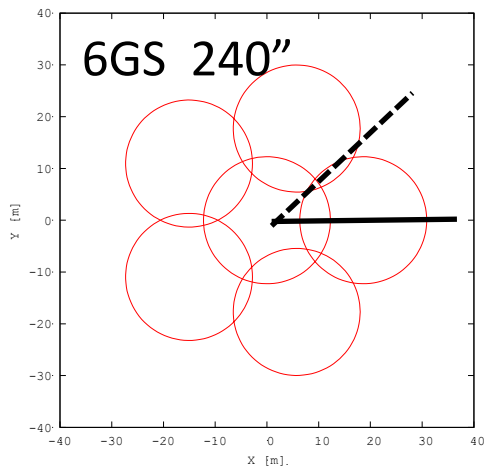
※ノイズ無し



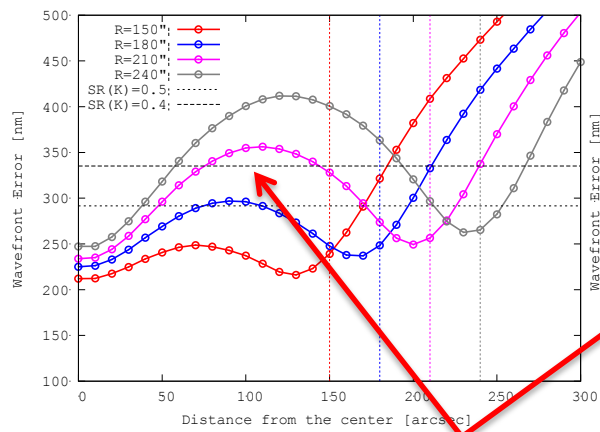


# 問題点

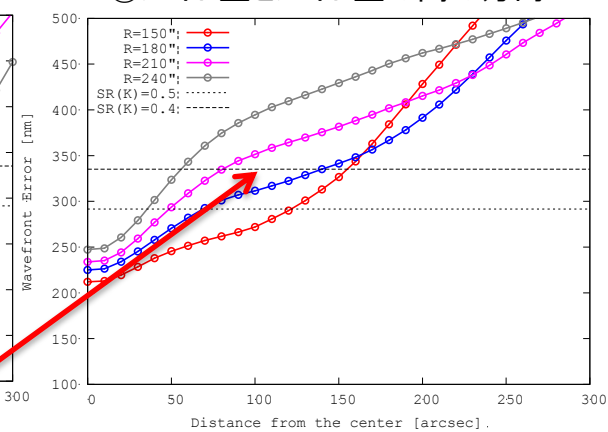
1. 測定値にはガイド星とガイド星の間の領域の情報も含まれているが、推定精度はガイド星の方向に比べて悪い。
2. 計算速度が遅い



①ガイド星と重なる方向



②ガイド星とガイド星の間の方向



この領域の波面誤差を小さくしたい

## 問題1に関して

- 高さごとに分離できていない。計算はガイド星方向に最適化されるため、ガイド星方向では各高さの推定誤差が結果的にキャンセルし合い、それ以外の方向では各高さの推定誤差が最終的な誤差に反映されている。
- 最も支配的でかつ全方向に共通な地表層の推定誤差が効いているのでは？

# 改良

トモグラフィーの計算とは独立に地表層成分を求め、測定値から地表成分の取り除いてからトモグラフィーで地表層以外の成分を計算する。

## 地表層を独立に求める方法

- 地表層はすべての方向で共通の成分である。
- **すべてのガイド星からの情報の平均値を地表層の揺らぎ成分とみなす。**

## これまでの手法

すべての大気揺らぎ



トモグラフィー

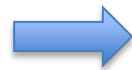
## 平均値を用いた手法

地表層

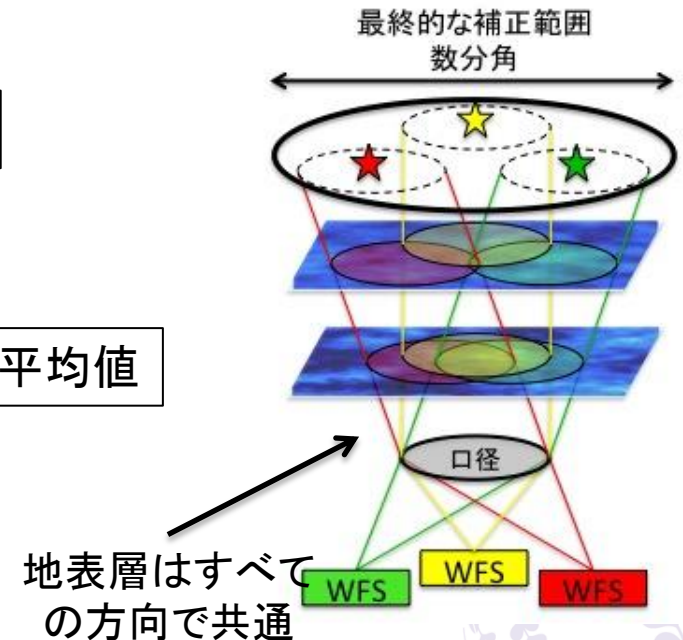


複数のガイド星の測定値の平均値

残りの大気揺らぎ



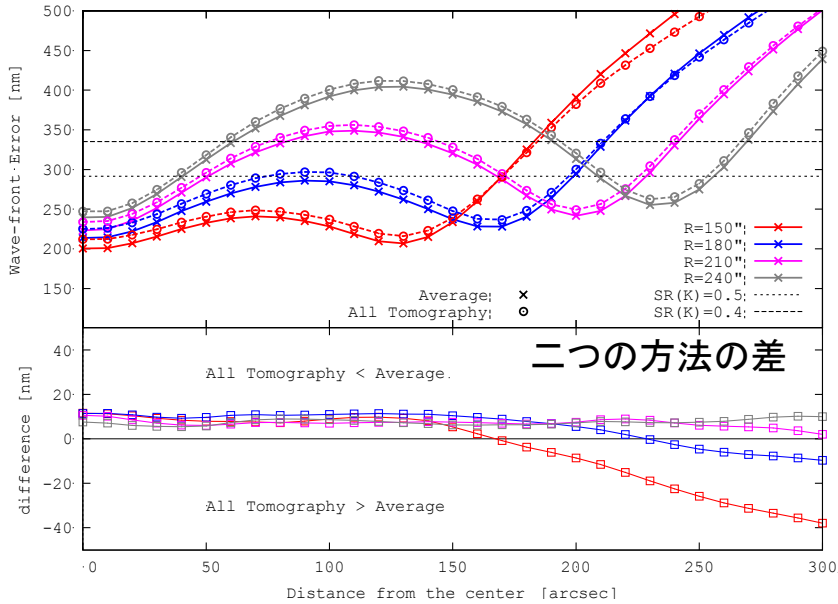
トモグラフィー



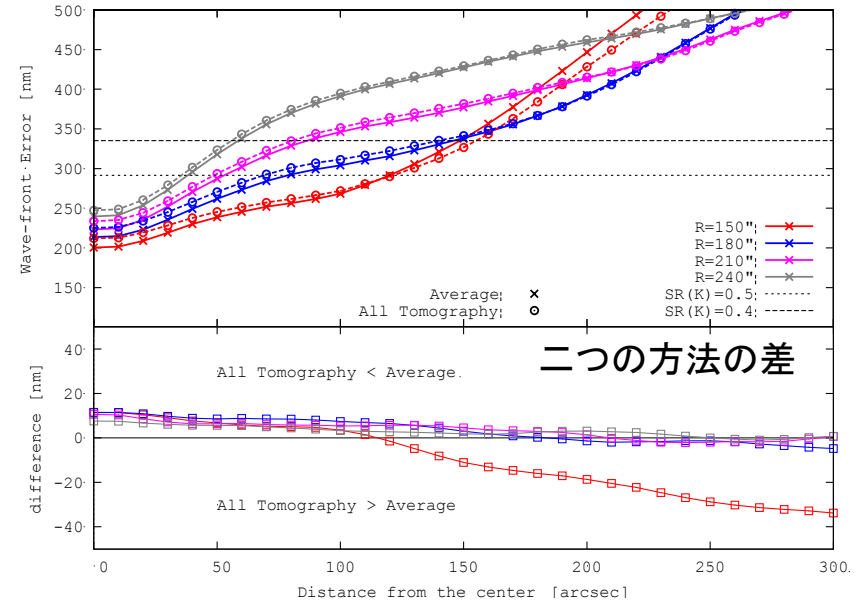
# 地表層を完璧に分離して計算

理想的に地表層を取り除いた場合のトモグラフィーの推定精度を検証する。

①ガイド星と重なる方向



②ガイド星とガイド星の間の方向



○: 地表層を理想的に取り除いた場合

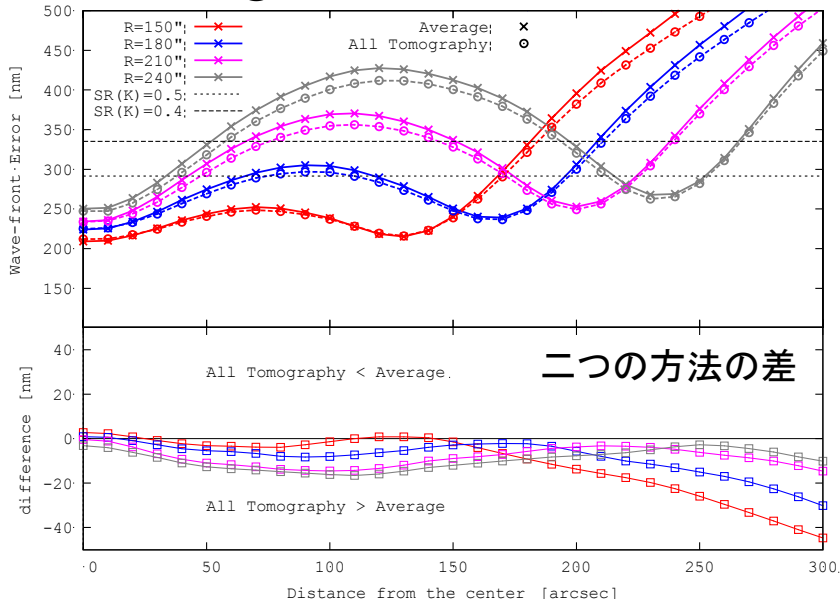
×: すべてトモグラフィを用いた結果

- 結果はほとんど変わらない。
- 計算時間も変わらない。

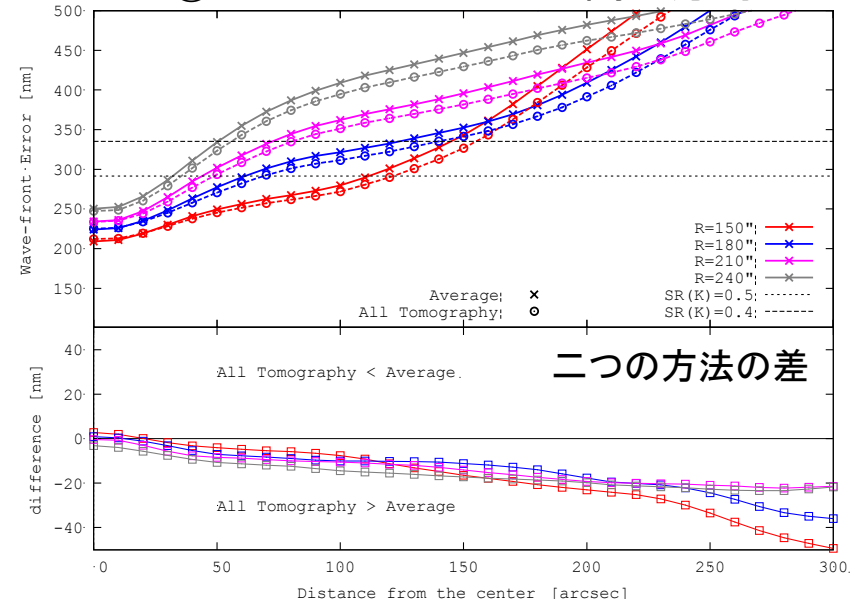


# 平均値を用いた結果

①ガイド星と重なる方向



②ガイド星とガイド星の間の方向



○: 平均値を用いた結果

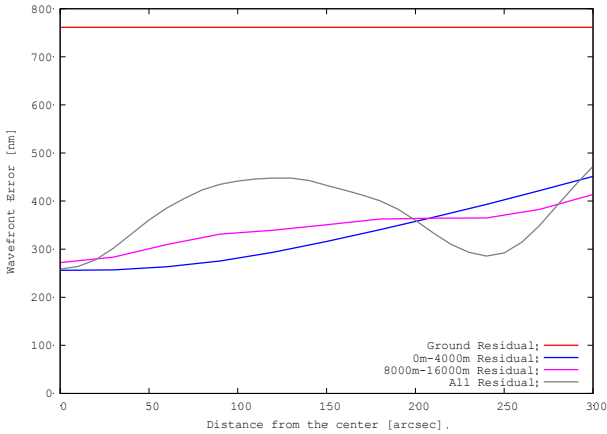
×: すべてトモグラフィを用いた結果

- 平均値を用いた場合の方が推定がわずかに悪くなる。
- 特にガイド星から離れた場所での差が大きい。これは平均値による地表層の推定が、トモグラフィによる地表層の推定よりも悪くなっていることが原因であると考えられる。
- 計算時間は特に変化無し。

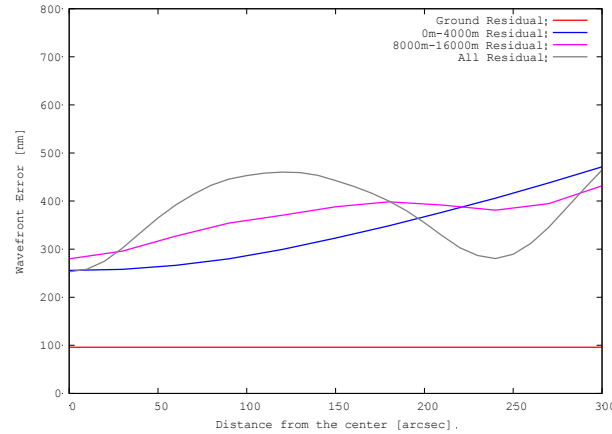


# 各方法の比較

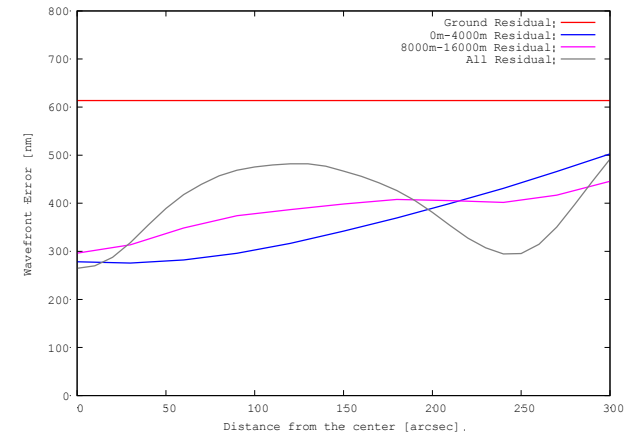
普通にトモグラフィ



理想的に地表層を分離した場合



平均値を用いた場合



赤: 地表層成分の推定残差

青: 地表から5層(0m~4000m)の推定残差

紫: 上から2層(8000m~16000m)の推定残差

グレー: 最終的な推定残差

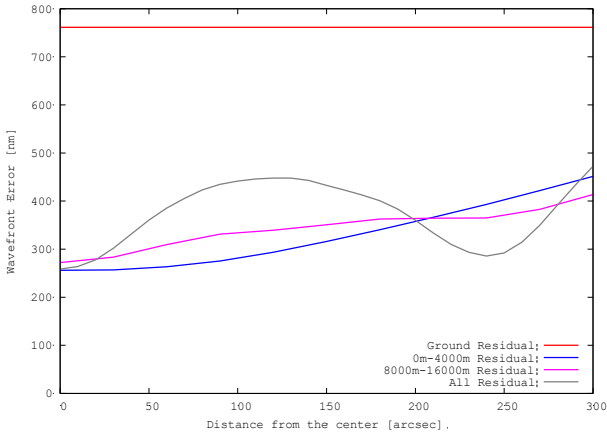
地表層成分の残差(赤)は異なるが、下5層の残差(青)と上2層の残差(紫)はほとんど変わらない。

その結果、最終的な結果も変わらない。

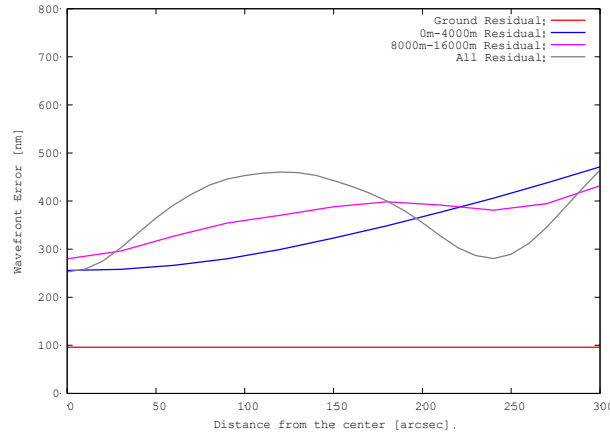


# 各方法の比較

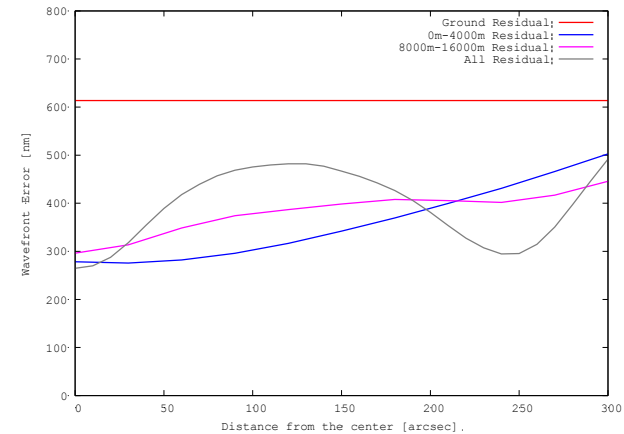
普通にトモグラフィ



理想的に地表層を分離した場合



平均値を用いた場合



## 用いた大気モデル

高度	0m	500m	1000m	2000m	4000m	8000m	16000m
相対的な強度	0.5960	0.0963	0.0325	0.0372	0.0869	0.0684	0.0826

- 地表層に5層は各高度が近いので、**トモグラフィの計算時に分離できない。**
- 地表層の推定が変わっても、その変化は**他の4層に吸収されてしまい最終的な結果には反映されない。**



# まとめ

## 推定精度について

- トモグラフィック波面再構成のシミュレーションを行った。
- 地表層をトモグラフィーとは独立に扱う手法について検討した。
- トモグラフィーの計算時に各高さの推定結果が他の高さの推定結果と分離できていないため、地表層を別に扱ったとしても最終的な結果は変わらなかった。

## 計算速度について

- 共役勾配法の反復計算にGPGPUによる並列計算を組み込んだ。
- 一回の反復は高速化されたが、反復回数が多いため計算時間は目標値にはほど遠い結果となった。



# 今後について

## 推定精度について

- うまく高さごとに分解して推定する方法を検討する必要がある。  
最小分散推定以外の手法？  
プレイヤーとして与えてる大気の共分散行列を変える？  
共役勾配法以外の解法？

## 計算速度について

- 現在～100秒なので、あと1万倍速くしたい・、目標は1kHz
- より効率的にGPGPU使う。  
GPGPUを用いた共役勾配法のプログラムが開発されている。  
現在、導入中……。





ポスターも出しています。

P-4

## 広視野多天体補償光学のための波面再構成

第二回可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2012/12/17, 18 東北大学 大野良人, 秋山幸

我々は次世代大型望遠鏡のための多天体補償光学(MOAO)の要素技術の開発を行っている。MOAOは数分角の視野内にある複数の天体に対して同時に補償光学を適用する新しいシステムである。本ポスターではMOAO実現に必要な不可欠な「広視野の大気歪みを立体的に推定するトモグラフィック波面再構成」の推定精度と計算速度についての検討状況を報告する。今回はシミュレーションを用いて①複数のガイド星の平均値から地表付近の大気揺らぎを推定する手法を用いた推定精度の向上、②GGPUを用いた並列化による高速化の検証を行った。

### 広視野多天体補償光学

1. 観るべきガイド星(GS)を波面センサー(WFS)で測定する。
2. WFSの情報から大気揺らぎの影響を推定する。
3. 推定した大気揺らぎをキャンセルするように可変形鏡(DM)を変形させる。
4. ターゲット天体をDMを通して観測することで大気揺らぎの影響を補正する。

#### 経路光学の成り立ち

GSとWFSが一つの経路光学

#### 広視野多天体補償光学

広視野多天体補償光学

図1: GSとWFSが一つの経路光学 図2: 広視野多天体補償光学 図3: 広視野多天体補償光学

### MOAO実現のために必要な波面再構成

- 大気揺らぎを立体的に推定するためにトモグラフィックな波面再構成が必要
- リアルタイムで補正するために高速な波面再構成が必要
- MOAOでは測定方向と補正方向が異なるのでオープンループ制御が必要、それに伴い高精度な波面再構成が必要である

### シミュレーションの準備

トモグラフィック波面再構成(最小分散推定)

$$(G^T G + \sigma C_0) X = G^T S$$

大気揺らぎと測定値の関係を表す行列  $G$  大気揺らぎの共分散行列  $C_0$  (コヒーレンス半径を仮定)

計算手法

- 再構成行列を直接求めるのは行列の大きさに厳しいので、実際は共役勾配法で反復的に解いている。
- 共役勾配法の計算にはGGPUを用いた並列計算を組み込む。共役勾配法は行列とベクトルのかかけ算の繰り返しなので、並列計算と相性がいい。
- コードはCUDAの行列計算用のパッケージ「CUSPARSE」が「CUBLAS」を用いて作成。
- 使用したGGPUはTesla C2070、CUDAのバージョンは3.2

計算速度0.201s、視野9'以上、精度は40'ピクセルでピクセル比4以上

### シミュレーションの概要

• 今回の計算の設定は以下の通り。

口径	30m	フリード長	0.156m (λ=930nm)でのアタリ波の半波長
WFSのピッチ	0.5m	評価する視野	半径5'
GS	1000個(半径100m)	大気のアーススケール	30m
推定する大気歪みの高さの深さ	0.25m(λ=400nm) 0.5m(λ=800nm)	モデル大気の大気揺らぎの初期値	0.05m
観測波長	λ=0.7(1000nm)	波面センサー	シャックハルトマン

• 大気モデル TMTのサイト調査で測定されたものを使用

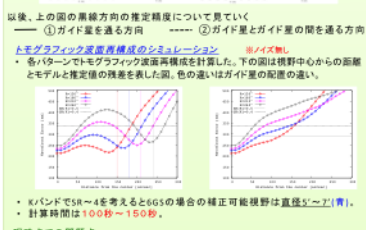
高度	0m	500m	1000m	2000m	4000m	8000m	16000m
強度	0.5960	0.0963	0.0325	0.0372	0.0869	0.0684	0.0826

地表成分が支配的である

### シミュレーションの結果

#### ガイド星の配置

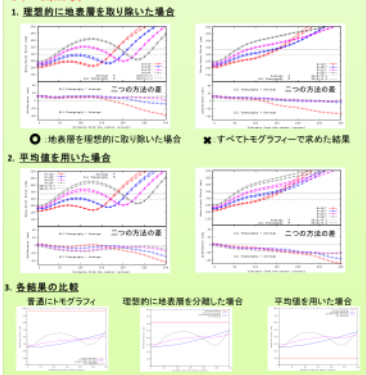
- GSは6個。中心の一つとその周りに五角形に配置する。
- 周りに配置するGSの距離は中心から150', 180', 210', 240'の4パターン
- 高度16000mのガイド星のパスを示す。



- Kバンドで5R~4を考えると6GSの場合の補正可能視野は直径5~7角(青)。
- 計算時間は100秒~150秒。

#### 現時点での問題点

1. 推定が高ごとに分解できていないため、ガイド星方向以外の方向の推定精度が悪い。
2. 計算速度が目標にまったく達していない。



赤: 地表層成分の推定残差 青: 地表から5層(0m~4000m)の推定残差  
 紫: 上から2層(16000m~18000m)の推定残差 グレー: 最終的な推定残差

- 各結果は地表層成分(赤)は異なる。
- 地表から5層(青)の推定は高度が近いので分解できていない。地表層の推定の違いはここで埋もれてしまい、最終的な結果には反映されない。

まとめ: 推定精度について  
 • トモグラフィックで高ごとに分解して推定できていないため、地表層を独立に扱っても結果は変わらなかった。

計算速度について  
 • 今回~100秒ほどだったので、あと10倍速くする必要がある。  
 • より効率的にGGPUを用いる、前処理付き共役勾配法のライブラリを試験中。

