

極限補償光学の解析的な性能評価

森本悠介(京大)

- ・極限補償光学のコントラスト比(地上の場合)

大気によるリミット + 装置によるリミット

- ・解析的な性能評価

大気、装置によるリミットの解析的な近似を行った

Contents

- 目的:

京大3.8m望遠鏡における極限補償
光学系の性能評価

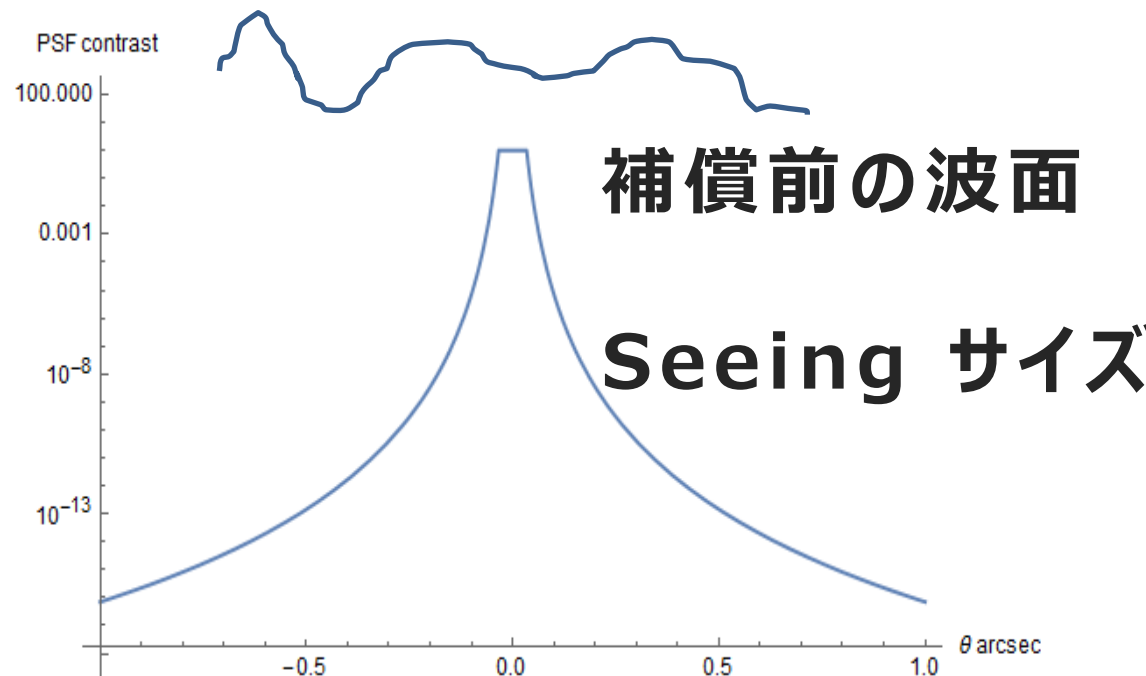
内容:

補償後の波面残差の導出:

色収差、センサーノイズ、etc...

コントラスト比

- 補償前の波面が入射
- このときのPSF強度の最大値を1と規格化
- 規格化された強度をPSFコントラストと呼ぶ
- 今回は1shotでのコントラスト比を議論する



京大3.8m望遠鏡での評価に 使用するパラメータ

パラメータ	値
望遠鏡直径, $D(\text{m})$	3.8
観測波長, $\lambda_i(\mu\text{ m})$	1.65
光源の絶対等級	m_v
WFS 測定波長, $\lambda_{WFS}(\mu\text{ m})$	0.8
WFS バンド幅 ($\mu\text{ m})$	0.2
WFS 量子効率, η	0.5
一列あたりの WFS 測定点数, n_{det}	24
0 等での光子数 ($\text{counts s}^{-1} \text{ m}^{-2}$)	1.03×10^{10}
$1.65\mu\text{m}$ でのフリード長, $r_0(\text{m})$	0.34
風速, $v(\text{m s}^{-1})$	10
開口の大きさ, $d(\text{m})$	0.1583
CMOS 読み出しノイズ, $e(\text{counts})$	1.6
CMOS 測定ピクセル数, m	4
1shot の露光時間, $t(\text{msec})$	3.3

補償後の波面残差

大気によるリミット

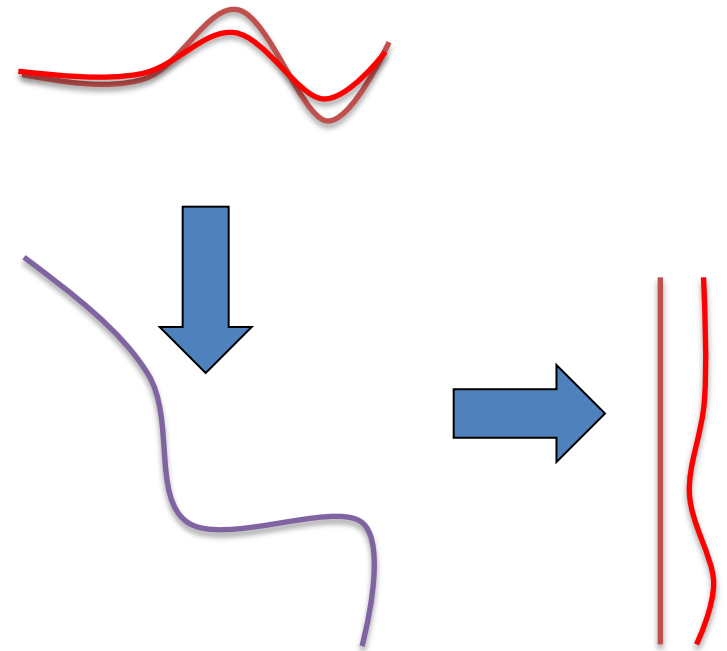
- 色収差による過補償
- 色収差による浮き上がり効果

装置によるリミット

- エイリアジング
- タイムラグエラー
- 測定誤差

色収差による過補償

- 波面位相の測定波長
800nm
- 観測波長
1.65 μ m
- 波長により波面位相の揺らぎが異なる
⇒ 屈折率によって特徴づけられる



赤色の波長に対しては過補償となっている

色収差による過補償

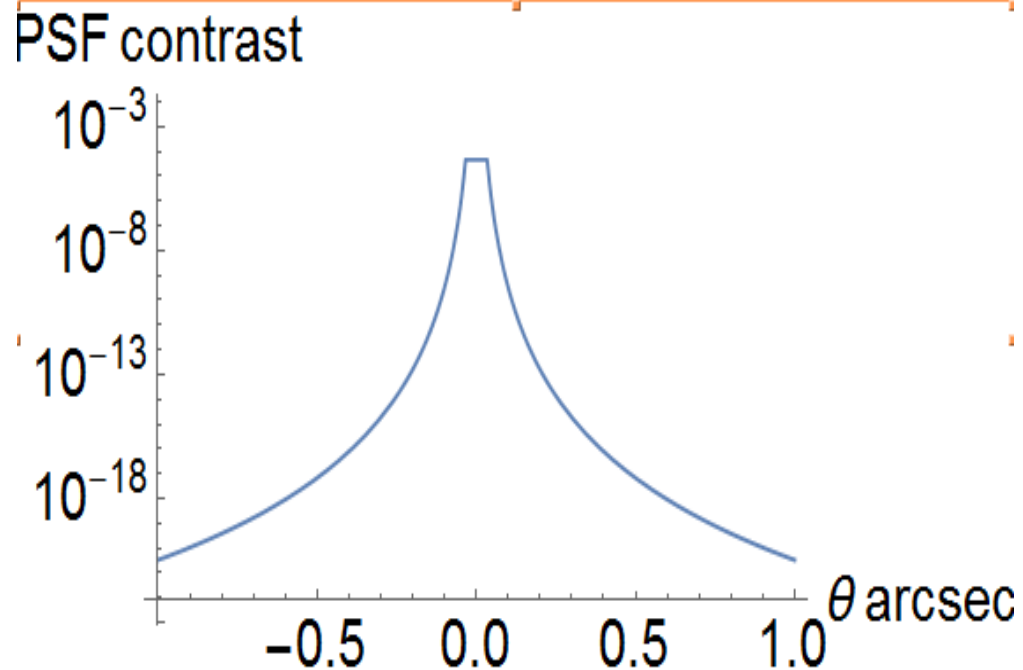
Fusco, T et al. 2006)

$$n(\lambda) = 1.0 + 8.34213 \times 10^{-5} + \frac{0.0240603}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{0.00015997}{38.9 - \lambda^{-2}}.$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi(x_1)_{chromatic} &= \phi(x_1)|_{\lambda=\lambda_i} - \phi(x_1)|_{\lambda=\lambda_{WFS}} \\ &\simeq \frac{\alpha - 1}{\alpha} \phi(x_1)|_{\lambda=\lambda_i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \Delta n(\lambda_i) / \Delta n(\lambda_{WFS}) \\ &= \frac{n(1.65) - 1}{n(0.8) - 1} \end{aligned}$$

$$\Delta\tilde{\phi}(\theta)_{chromatic} = \frac{\alpha - 1}{\alpha} \tilde{\phi}(\theta)$$

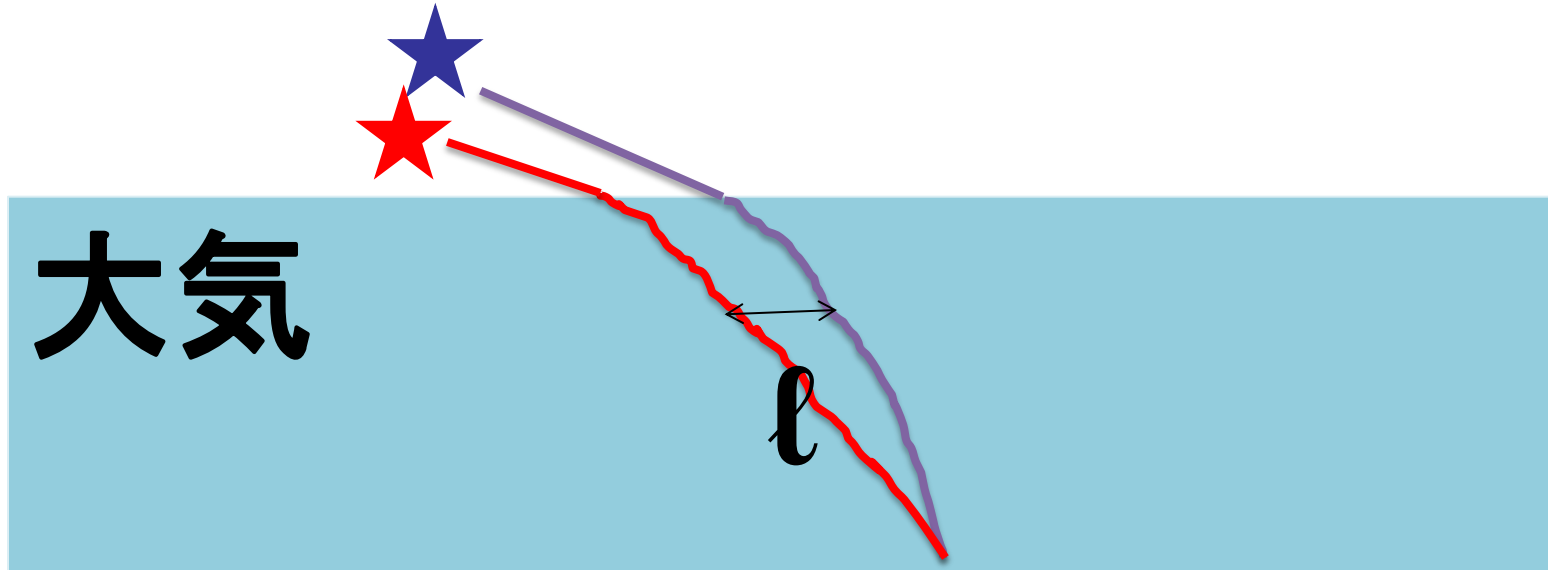


色収差による浮き上がり効果

- 色収差による浮き上がり効果

$\lambda_{imag} \neq \lambda_{WFS}$ のとき

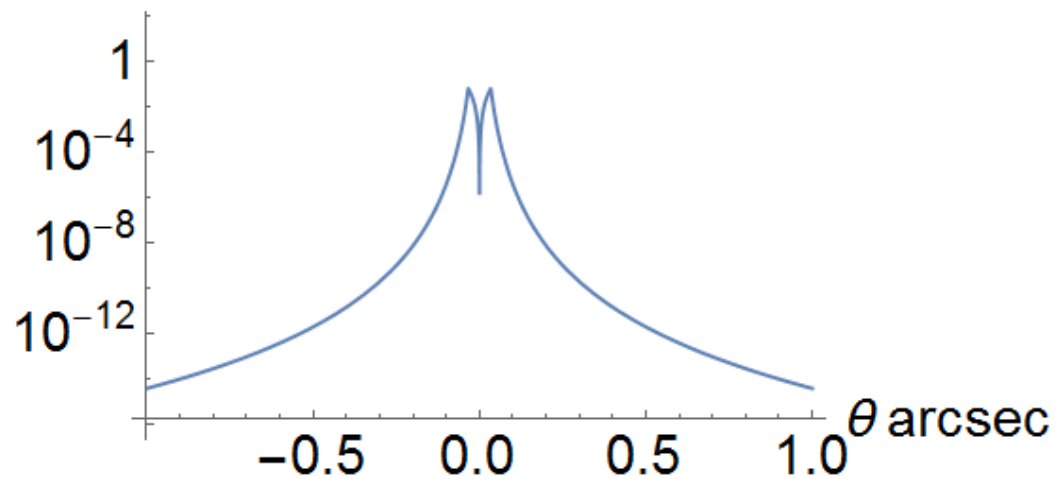
イメージングに用いる波長の光とWFSの測定に用いる波長の光で光の経路が異なる
→ 波面の受ける擾乱が異なる



色収差による浮き上がり効果

$$\Delta\tilde{\phi}(f)_{refraction} = \frac{i2\pi\theta}{\lambda_i} l\tilde{\phi}(\theta)$$

PSF contrast



装置リミット

- エイリアジング

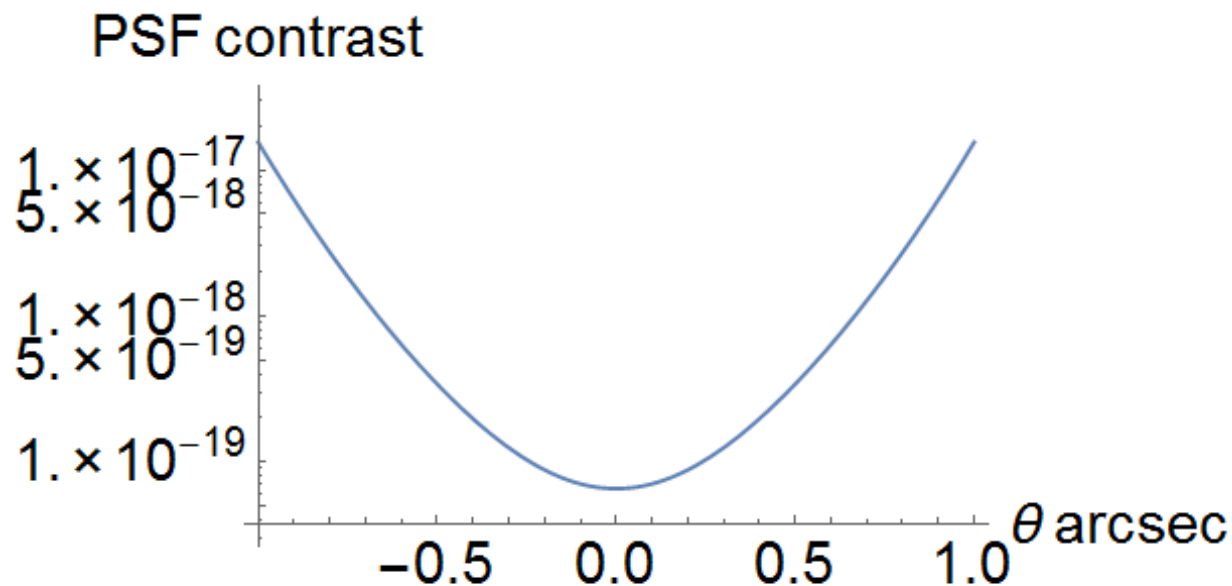
可変形鏡のアクチュエータの数で補償可能な空間周波数領域が決まる

SHWFSの場合、マイクロレンズアレイのピッチ間隔/
アクチュエータの数で決まる

測定できない周波数成分は低次の空間周波数成分として測定される

エイリアジングエラー

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{\phi}(f)_{aliasing} &= \tilde{\mathcal{R}}[\tilde{\mathcal{M}}[\tilde{\phi}(f)|_{f \geq f_{Ny}}]] \\ &= \tilde{\phi}(f)|_{f \geq f_{Ny}} \otimes \text{III}(df) \quad (f < 1/2d) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{\phi}(f \pm 2f_{ny}) \quad (f < 1/2d).\end{aligned}$$



タイムラグエラー

- 乱流層の移動

可変形鏡の制御に3msec使う場合、3msecのタイムラグが生じる。このとき、乱流は30cm移動する。

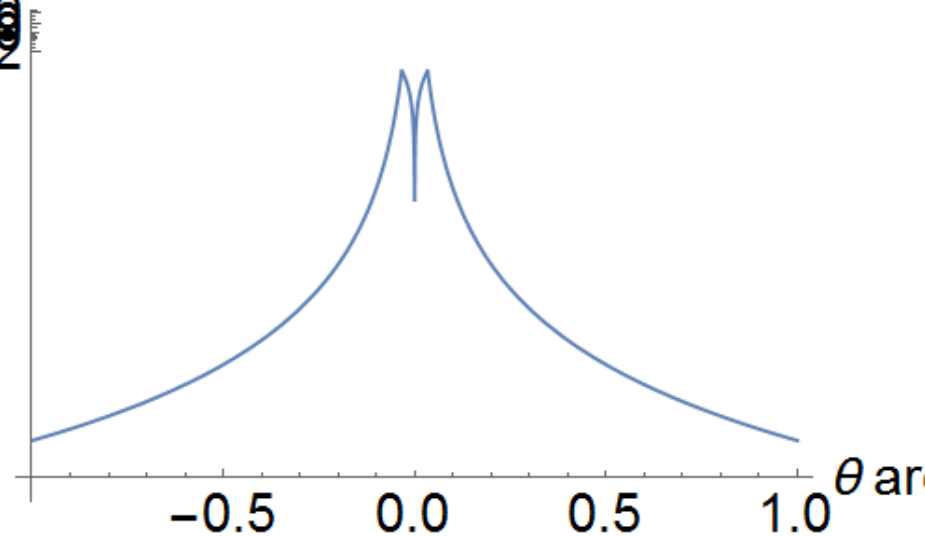
$$\Delta\phi(x_1)_{timelag} = \phi(x_1 + vt) - \phi(x_1)$$

$$\sim vt \frac{d\phi(x_1)}{dx_1}$$

$$\Delta\tilde{\phi}(\theta)_{timelag} = \frac{i2\pi\theta}{\lambda_i} vt \tilde{\phi}(\theta)$$

PSF contrast

0.050
0.002



測定誤差 (SHWFS)

SHWFSによる測定を下記のように定式化
周波数空間への伝播を調べる

$$S(u) = \left(\frac{d\phi(u)}{du} \otimes \Pi(u/d) \right) \cdot \text{III}(u/d)$$

$$\Pi(u) = \begin{cases} 1 & (|u| < d/2) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

$$\text{III}(u) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(u - nd)$$



$$\tilde{S}(f) = \left(\Xi_{SH}(f) \tilde{\phi}(f) \text{sinc}(df) \right) \otimes \text{III}(df)$$

ここで

$$\Xi_{SH}(f) = 2i\pi df$$

は実空間から周波数空間への伝播係数

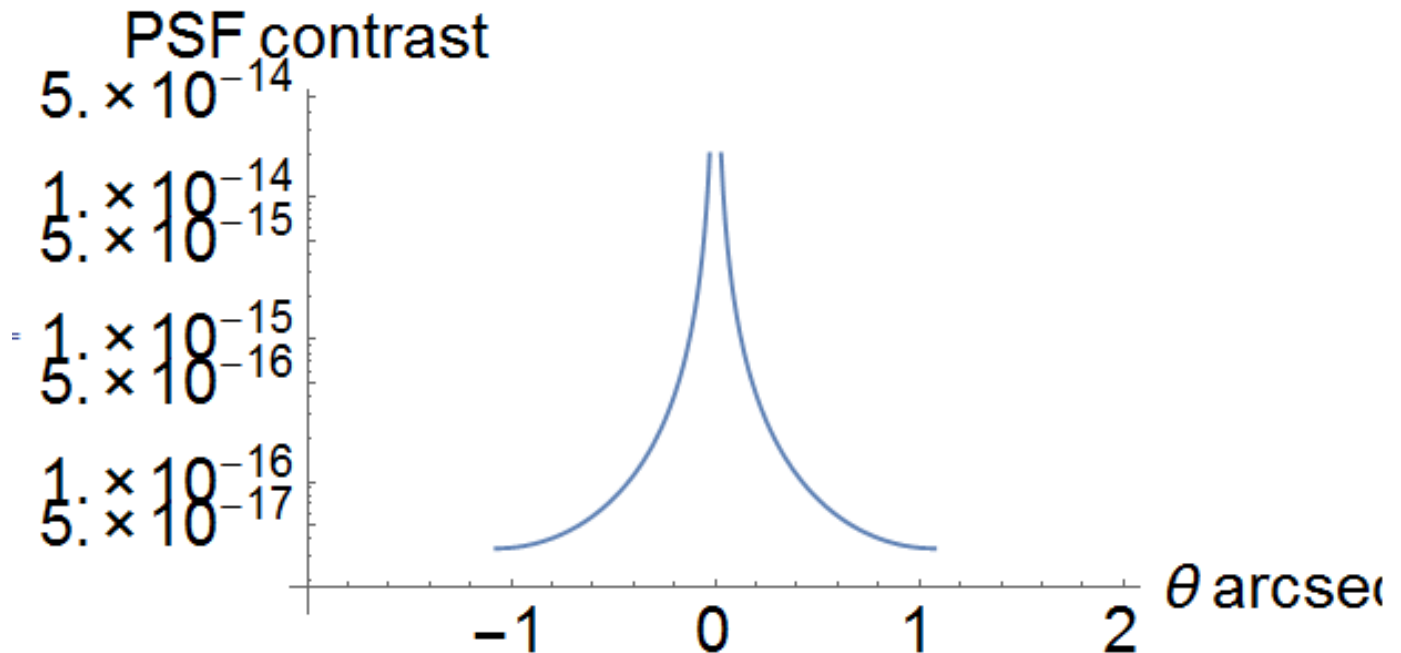
測定誤差 (SHWFS)

読み出しノイズ,光子ノイズによる

測定誤差がある場合の像面のエラーとして伝播

6等の場合

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{\phi}(\theta)_{measure} &= \mathcal{R} \left[\sqrt{\sigma_p^2(x_1) + \sigma_r^2(x_1)} \right] \\ &= \frac{\sqrt{\sigma_p^2(x_1) + \sigma_r^2(x_1)}}{(i2\pi\theta d/\lambda_i)\text{sinc}(\theta d/\lambda_i)} \quad (\theta < \lambda_i/2d)\end{aligned}$$



性能評価(まとめ)

	0.1" でのPSFコントラスト
色収差による過補償	4×10^{-10}
色収差による浮き上がり効果	2×10^{-8}
エイリアジング	7×10^{-20}
タイムラグエラー	2×10^{-8}
測定誤差(6等) (10等)	1.5×10^{-15} 6×10^{-14}

色収差とタイムラグによるエラーがコンパラ
測定誤差はその他のノイズに比べて十分小さい