

極限補償光学装置:

点源回折干渉計方式波面センサの開発

山本広大

松尾太郎、木野勝 (京都大)、今田大皓 (筑波大)

京大岡山3.8m望遠鏡の観測対象の一つ
年間100晩太陽系外惑星の直接撮像観測

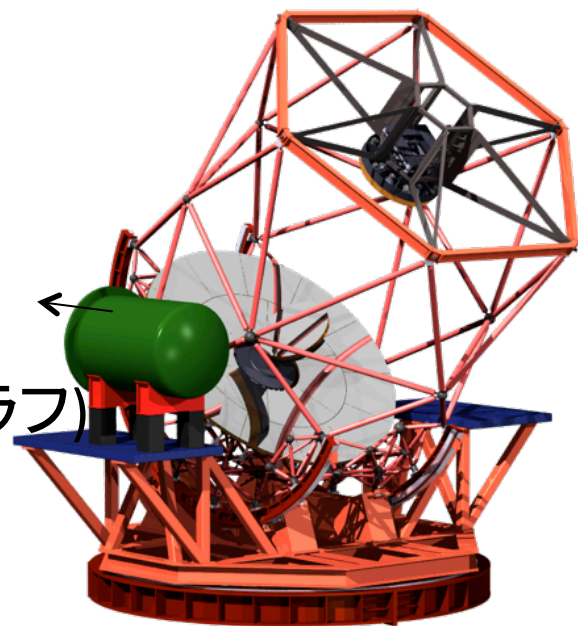
→0".1で 10^7 のコントラストが必要
(木星質量の惑星を検出)

惑星撮像装置SEICAを開発中。
搭載される極限補償光学装置の
波面センサを検討する。

京大岡山3.8m望遠鏡

SEICA

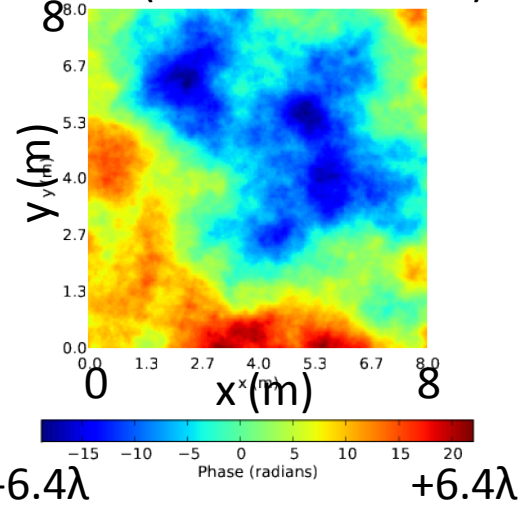
(ExAO+
コロナグラフ)



補償光学

波面の振幅(強度)/位相が変化→スペックル

望遠鏡主鏡面での位相ムラ(シミュレーション)



地球大気で波面形状/強度が変動

風速 ~ 10 m/s
シーイング ~ 2 秒

補正された波面

ビームスプリッタ

カメラ

WFS
波面センサ

計算システム

DM
可変形鏡

望遠鏡

大気を通過した波面

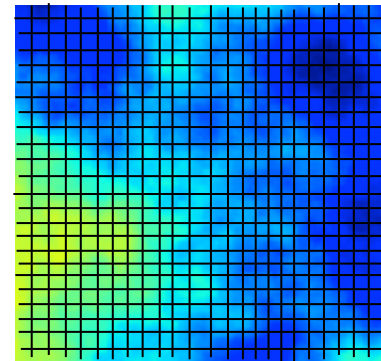
10^7 のコントラストを達成するために

高精度 ($1/20\lambda$; P-V)

高頻度 (5-10 kHz)

高空間周波数 (1辺24素子)

風速→



3.8m $\pm 3\lambda$


- ・24分割で ~ 16 cm
- 風速10m/sなら
- 0.016秒で隣の要素に移動(62.5Hz)
- ・1/10程度の移動
- ・DMの制御10回
- 60×10×10Hz

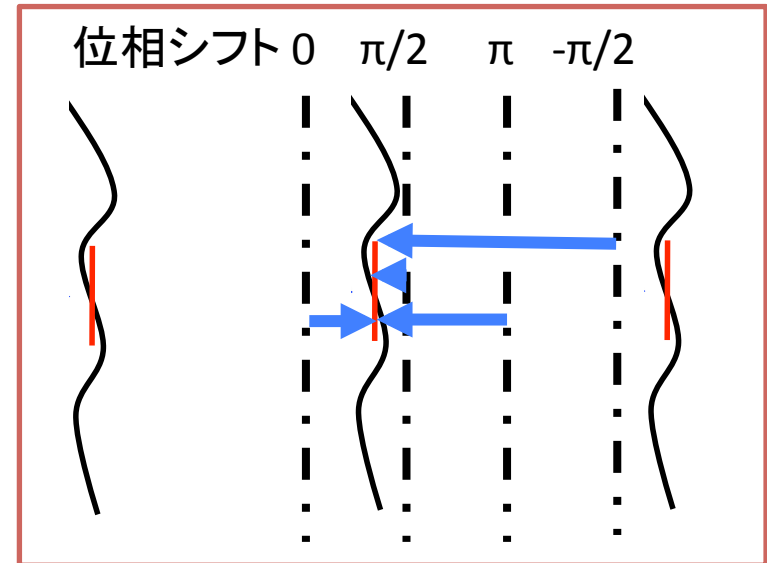
直接位相測定: 一般的特性

- 参照光と被検光の干渉で位相差(波面形状)を測定
 - 位相差なので最大 $[-\pi : \pi]$ の測定 (unwrappingで範囲拡大)
- 参照光(or 被検光)に位相シフト($0, \pi, \pi/2, -\pi/2$)を与えて干渉させる

位相シフトの与え方

- 時間的な変調
- 偏光を利用

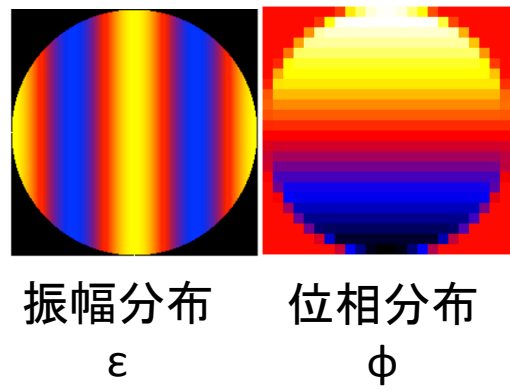
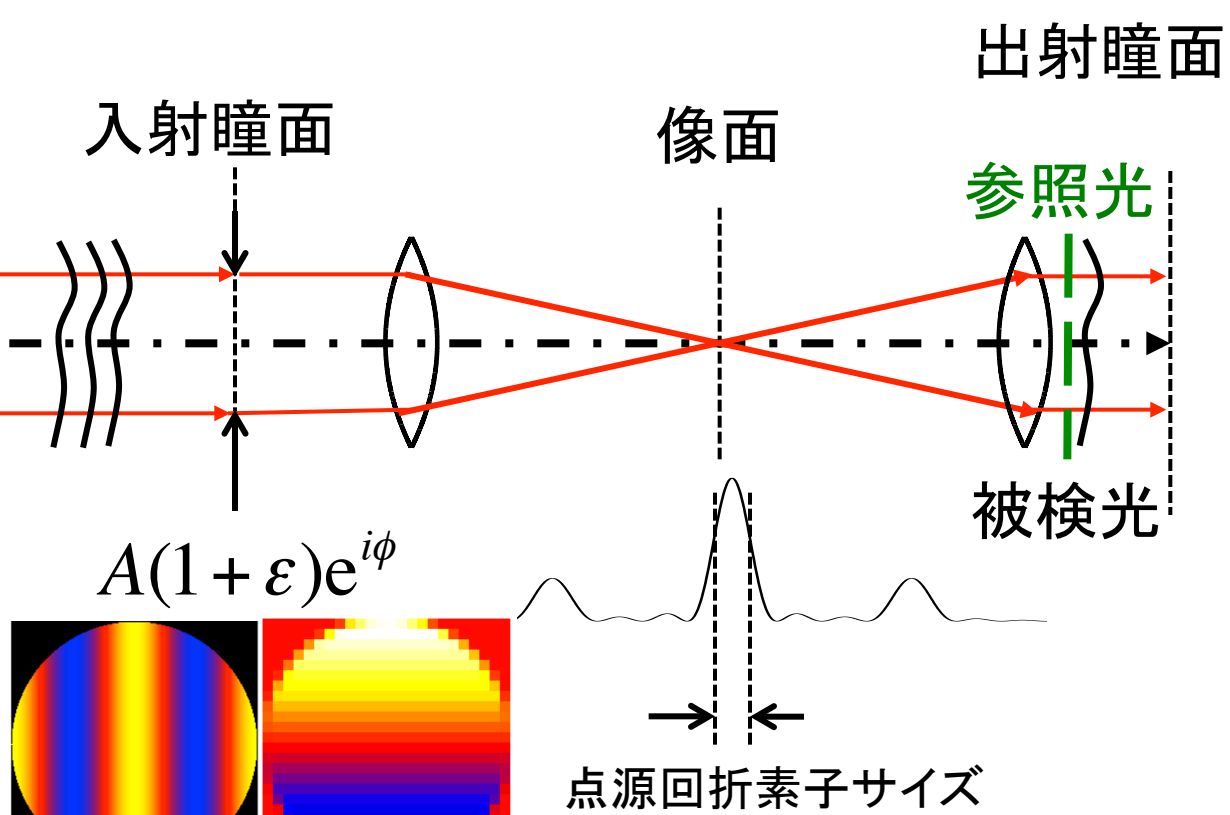
 後述



+ **振幅**を加えて複素振幅の測定 & 補償
→ より高いコントラストの観測が可能に。

直接位相測定: 点源回折干渉計(PDI)

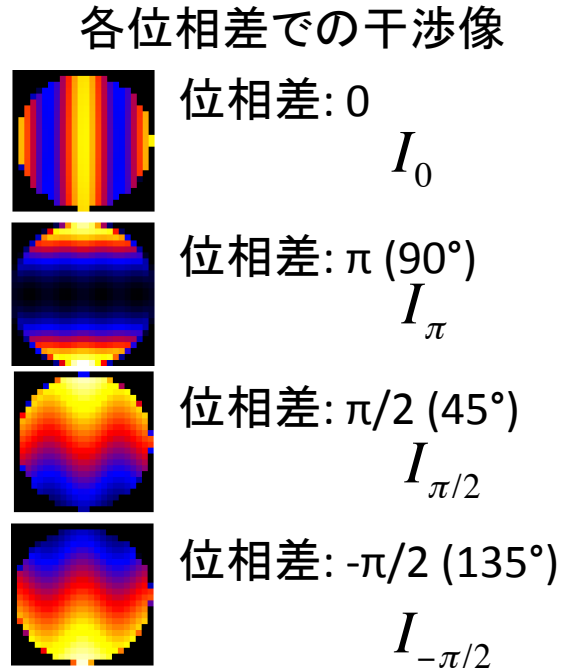
- 結像面の点源回折素子で参照光を生成。
- 被検光と参照光に位相差を与えて干渉させる。



点源回折素子サイズ

位相差を与える方法

- ・ピンホール内外の透過率差
- ・機械的
- ・偏光



$$\phi = \text{atan} \left(\frac{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}{I_0 - I_{\pi}} \right)$$

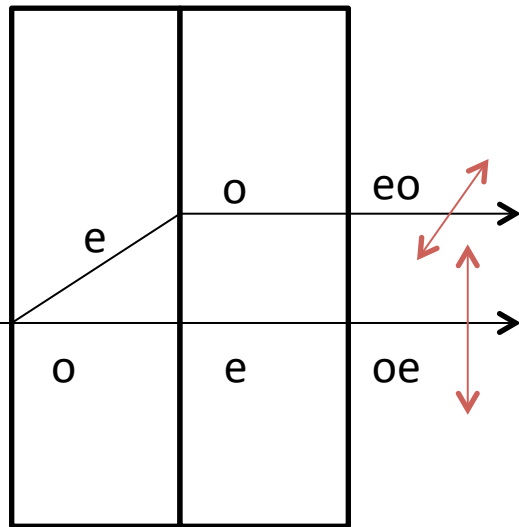
位相情報を取得できる

4位相同時測定に必要な光学素子

サバール板

偏光方向によって光線を「同一面内で」分割する

複屈折2枚



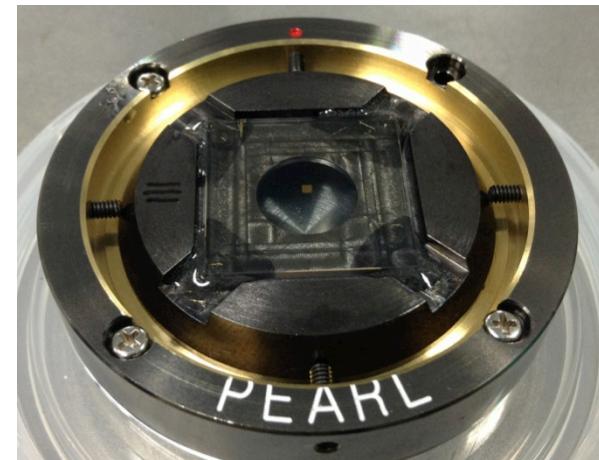
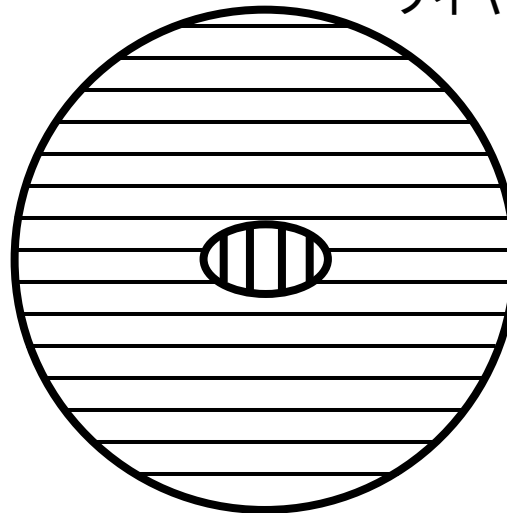
	eo光	oe光
偏光方向	↔	↕

点源回折干涉偏光

ビームスプリッタ(PPBS)

偏光方向によって光線を「反射と透過に」分割する

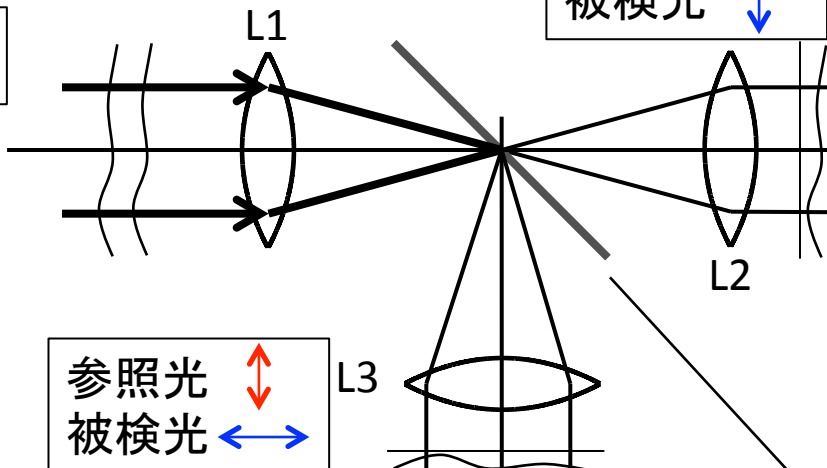
ワイヤグリッド型のPPBS



偏光方向	ピンホール内	ピンホール外
↔	反射	透過
↕	透過	反射

PDIWFS

被検光



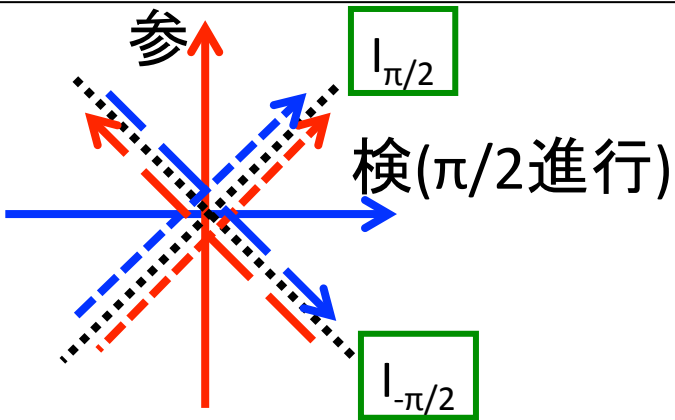
参照光
被検光

1/4波長板

サバール板
(45°)

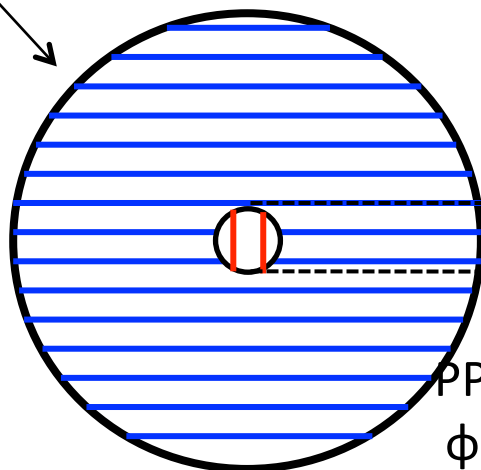
-45° +45°
 $I_{\pi/2}$ $I_{-\pi/2}$

反射側

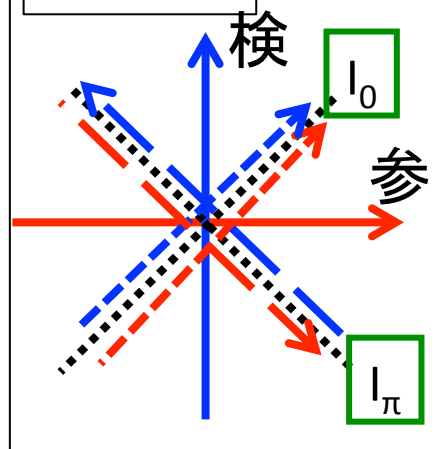


参照光
被検光

(45°)



透過側



グリッドと
直交成分→透過
平行成分→反射

ϕ

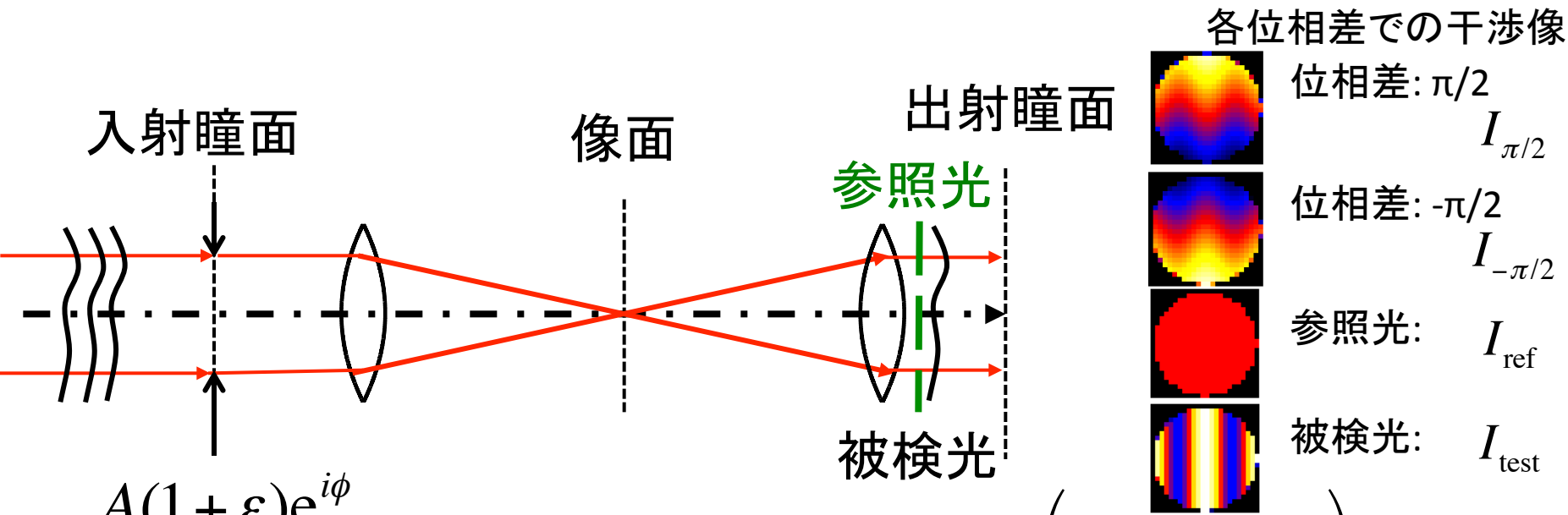
PPBSピンホール径
 $\phi = 0.3\lambda/D$ (PDI)

4位相(0, π , $\pi/2$, $-\pi/2$)の同時取得が可能

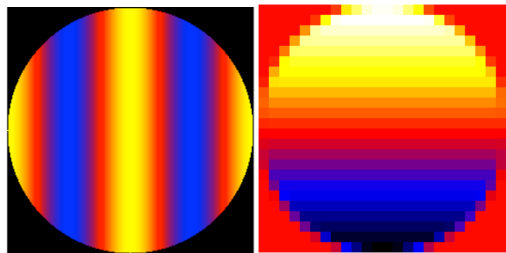
ピンホール透過後の参照光・被検光の定式化→今田+2015 accepted (→P13)

複素振幅測定PDI(caPDI)

PDIの0, π の干渉の代わりに参照光、被検光の強度分布を測定→複素振幅(位相+振幅)測定



$$A(1 + \varepsilon)e^{i\phi}$$



振幅分布

ε

位相分布

ϕ

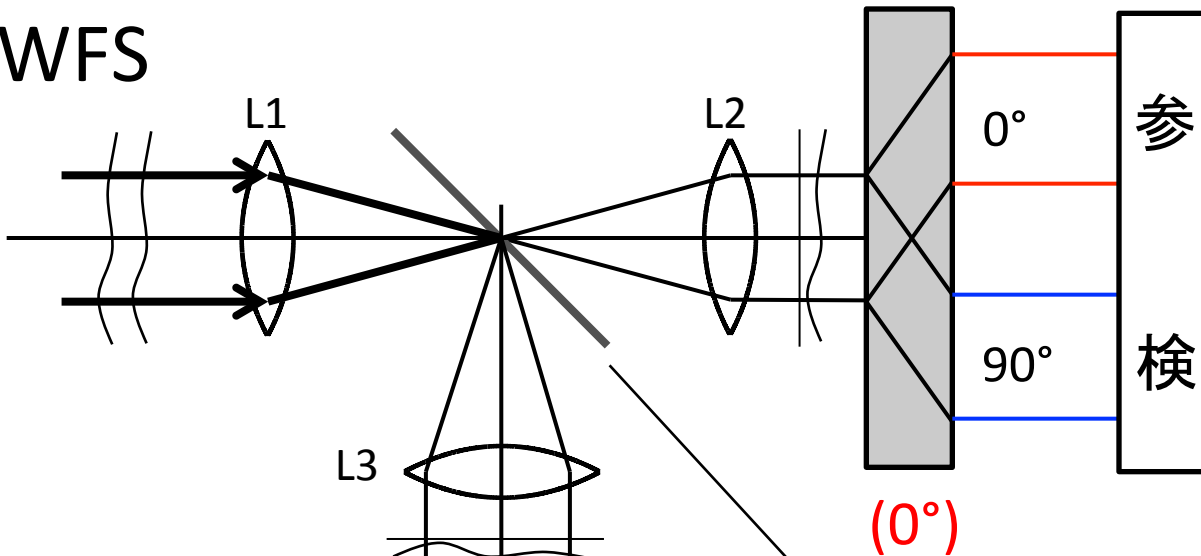
位相分布:
$$\phi = a \sin \left(\frac{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}{2\sqrt{I_{ref} I_{test}}} \right)$$

振幅分布:
$$\varepsilon = \alpha \sqrt{\frac{I_{\pi/2} + I_{-\pi/2} + I_{test} - I_{ref}}{2I_{ref}}} - 1$$

α はピンホール内/外をでの強度比

caPDIWFS

被検光



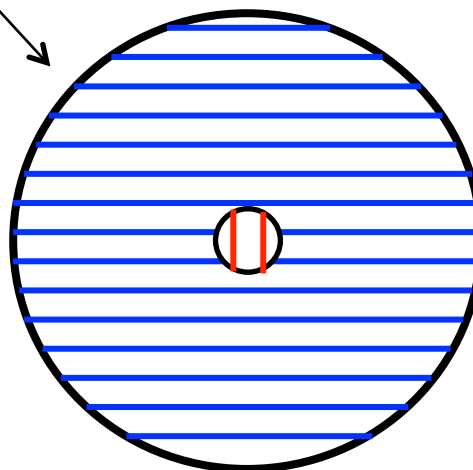
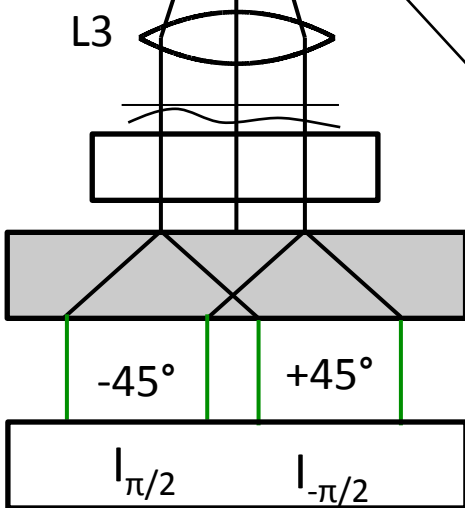
透過側

検 I_{test}

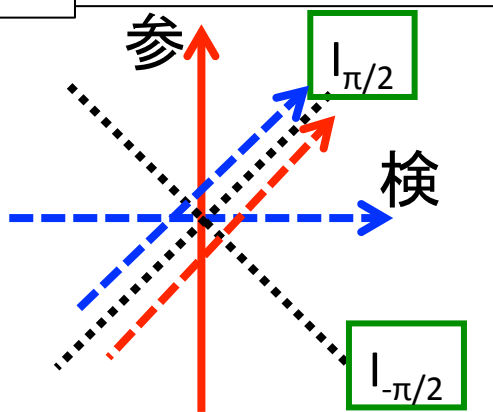
参 I_{ref}

1/4波長板

サバール板
(45°)



反射側

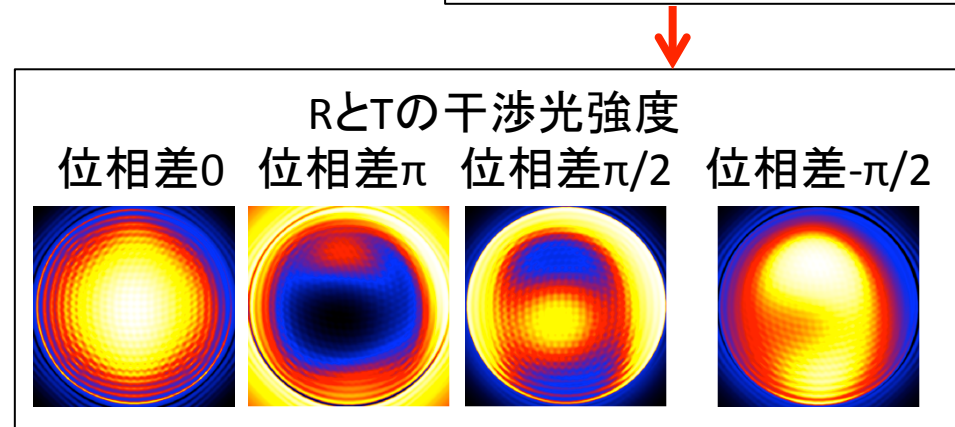
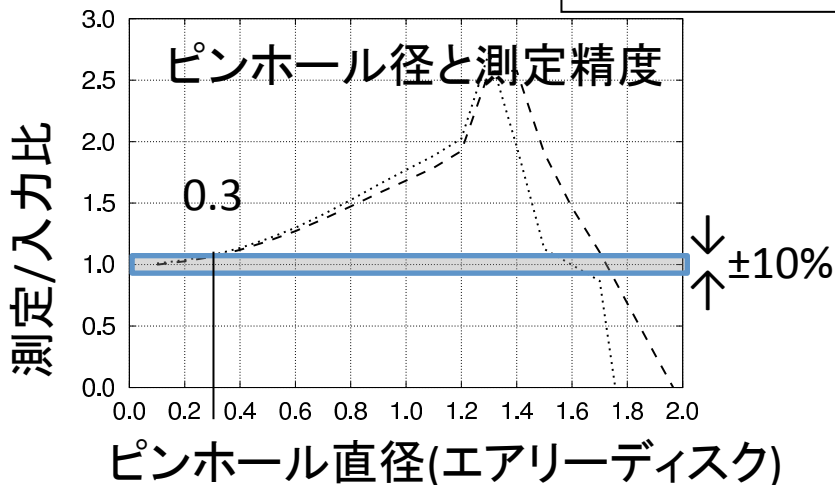
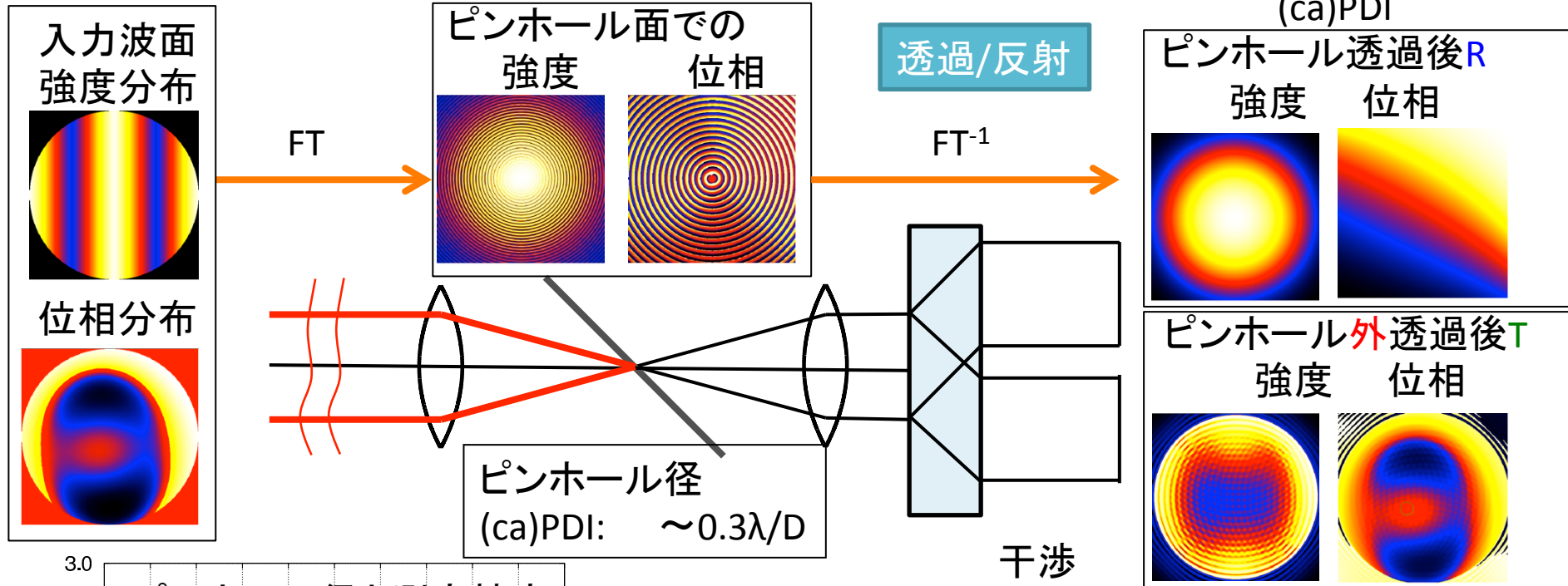


変更点は透過側のサバール板の
設定(干渉を起こさせない)だけ

→数値計算で性能を確認

WFSの性能評価シミュレーション

- 入力した波面の情報をどれだけ測定出来るか。



性能評価シミュレーション1. 位相測定

• 入力した波面の位相を測定。

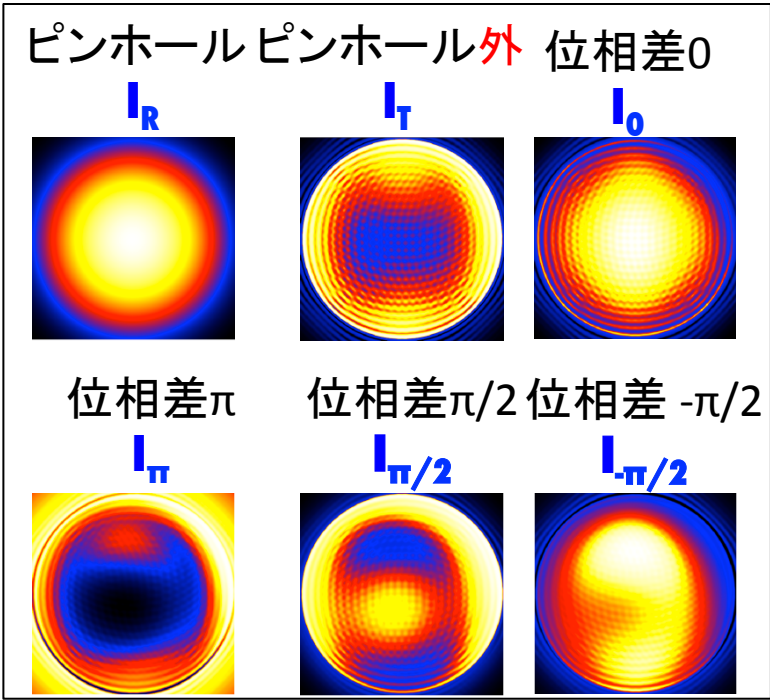
入力: Zernike 収差の8モード
(tip/tilt, 非点x-y, defocus, コマ, 球面)
0-1.0 λ(P-V)まで

測定: PDIWFS

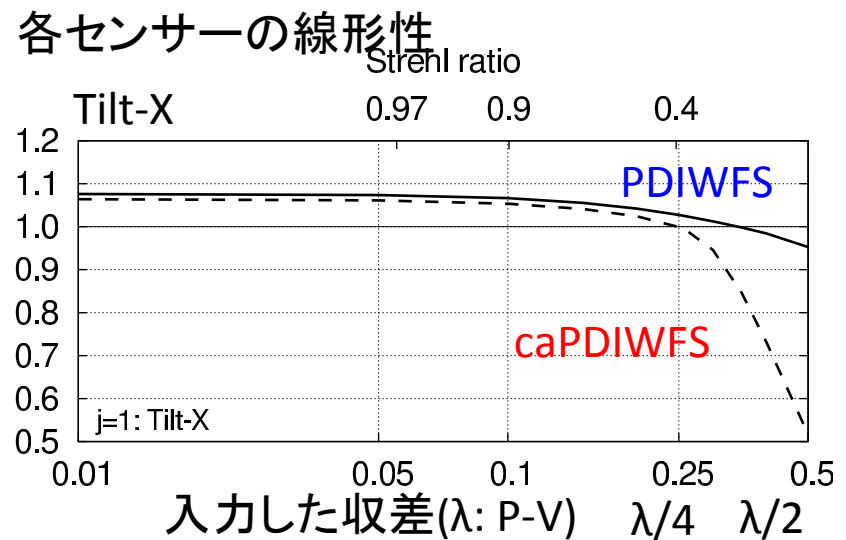
$$\phi = \text{atan} \left(\frac{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}{I_0 - I_{\pi}} \right)$$

: caPDIWFS

$$\phi = \text{asin} \left(\frac{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}{2\sqrt{I_{ref} I_{test}}} \right)$$



• 各WFSの、各モードでの振る舞いは同じ
• caPDIは $-\lambda/4 : +\lambda/4$ で高精度測定可能
• PDIは $-\lambda/2 : +\lambda/2$ で測定可能
両センサとも10%程度のずれがあるが、
 $< \lambda/4$ の範囲で線形性が高いため、キャリブレーションが可能である。

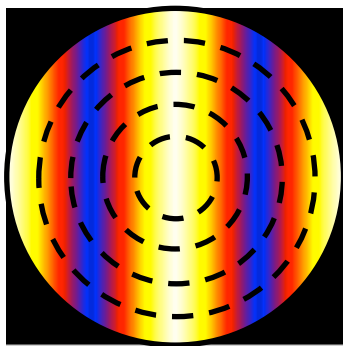


性能評価シミュレーション2. 強度測定

- 入射波面に(強度)振幅変化を与え、測定を模擬。

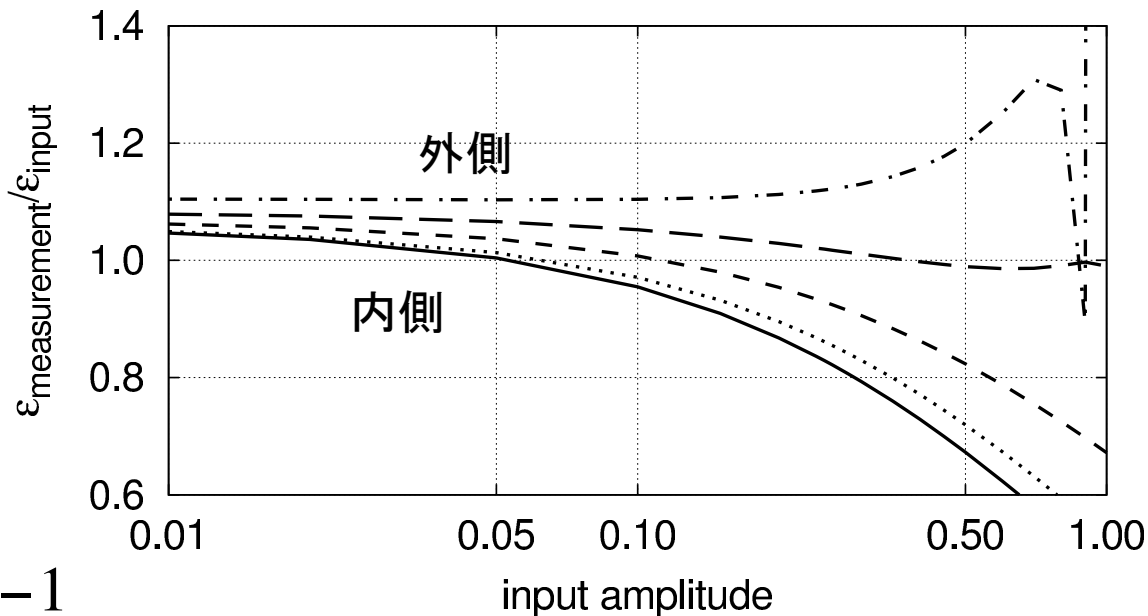
入力: 空間周波数2の強度変動

$$\varepsilon(x, y) = b \cos(2\pi f x)$$



測定: caPDIWFS

$$\varepsilon = \alpha \sqrt{\frac{I_{\pi/2} + I_{-\pi/2} + I_{\text{test}} - I_{\text{ref}}}{2I_{\text{ref}}}} - 1$$



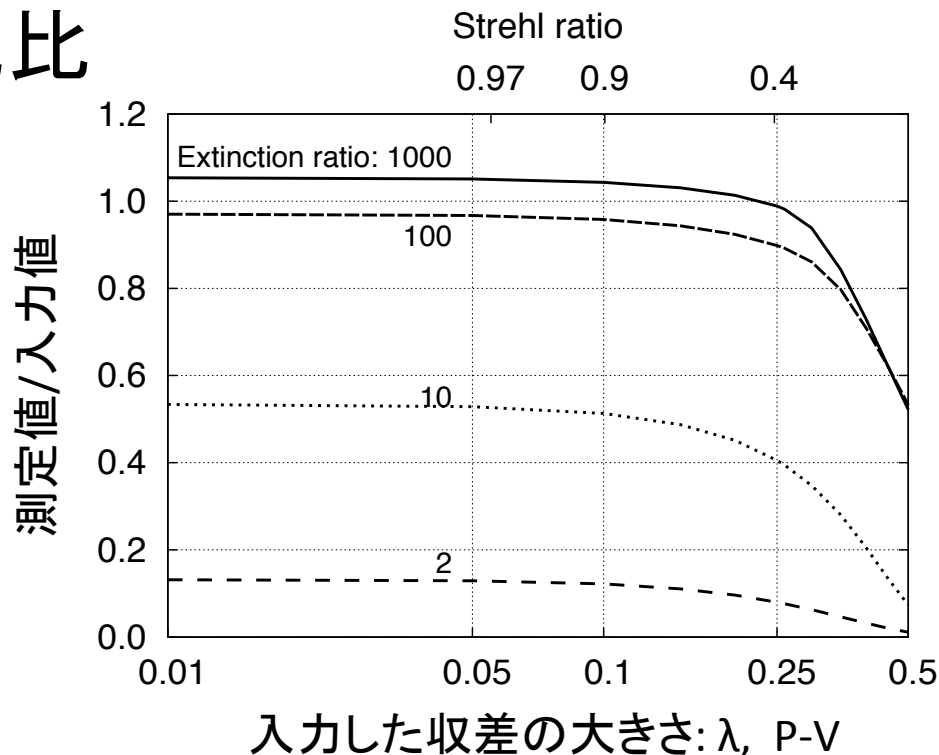
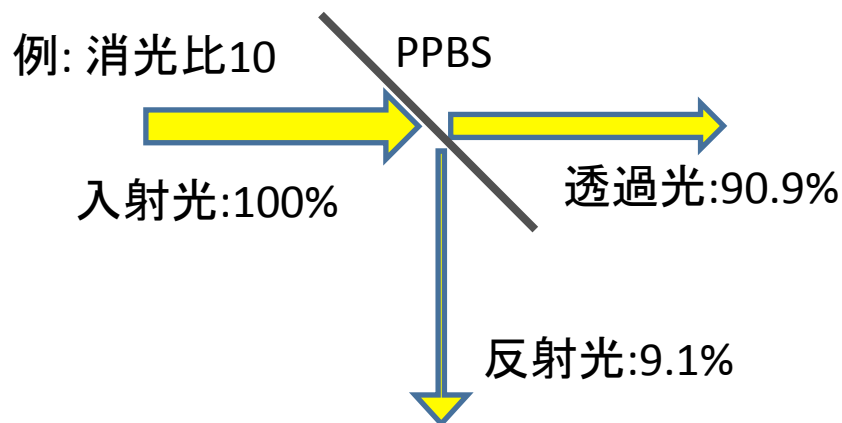
caPDI波面センサは振幅測定が振幅測定が可能

振幅の変動が大きくなると精度が悪化する。

→線形性の良い精度(10%以下)であれば、キャリブレーションできる。

性能評価シミュレーション3. PPBS性能

• PPBSの偏光分離・消光比



消光比が悪化すると測定値/入力値の比が悪化。

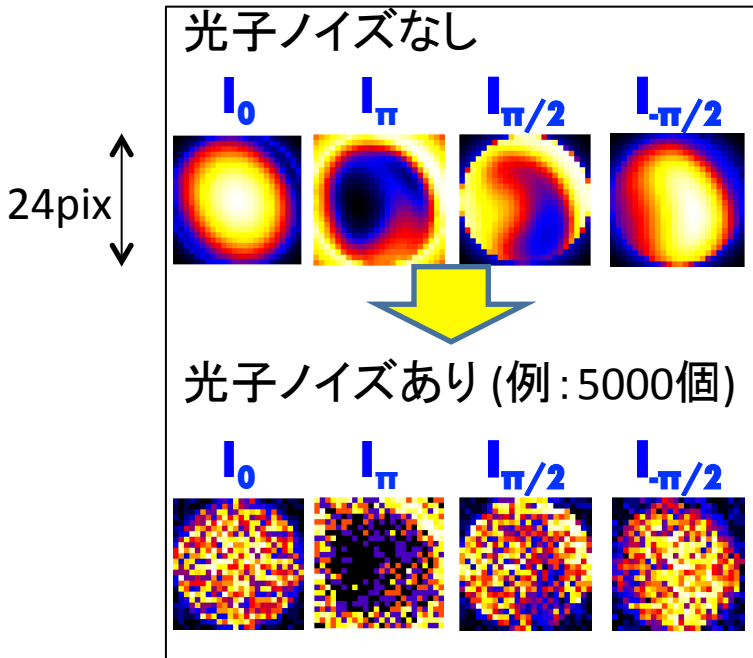
→線形性は残っている(比が一定値)のでキャリブレーション可能

性能評価シミュレーション4. フォトンノイズ

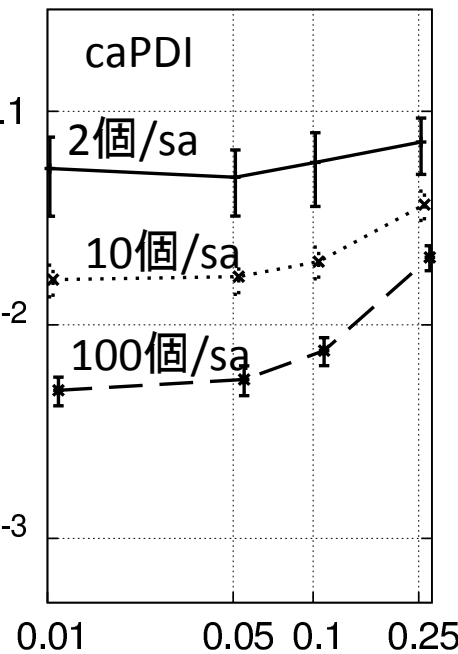
入射波の光子数の影響

各光子数、センサで26回シミュレーション

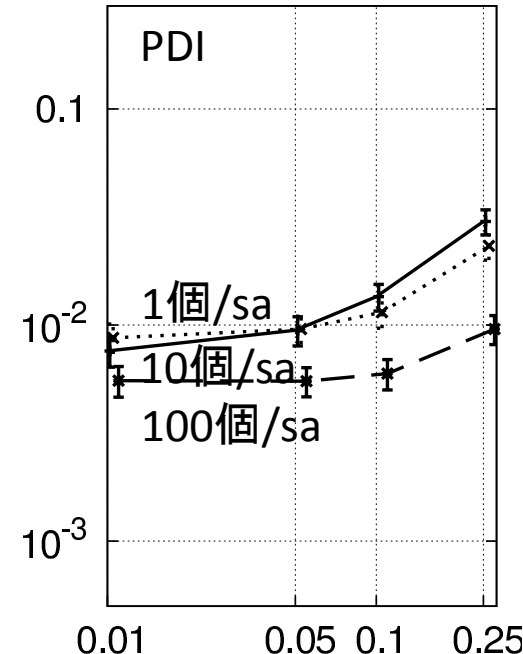
[検出面]を差し渡し24pixel, 総pixel数449個に分割。入射総光子数を変えて位相測定。



測定残差と位相測定量の差



input (wavelength)
 caPDI 1000 count —
 caPDI 5000 count
 caPDI 50000 count - -



input (wavelength)
 r-PDI 500 count —
 r-PDI 5000 count
 r-PDI 50000 count - -

PDIのほうが光子ノイズに強い
 $\lambda/20$ 程度の精度が達成できる。

caPDI方式の提案とシミュレーションによる性能評価を論文化

→Yamamoto+2015 accepted

SEICA補償光学

傾斜計測

低速、粗い波面制御

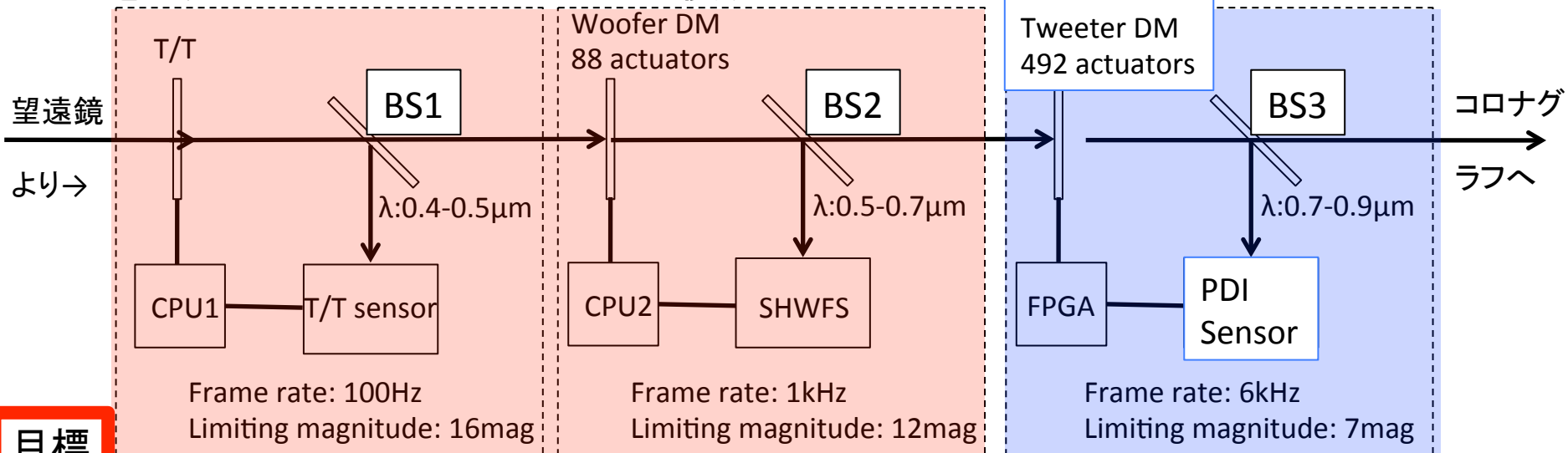
Tip/Tilt部 視野内で星像を安定させる

Woofer部 $1/4\lambda$ 程度まで波面補償する

位相計測

高速、高精度波面制御

Tweeter部 $1/20\lambda$ 程度まで波面補償する



目標

高精度 ($1/20\lambda$; P-V)

高頻度 (5-10 kHz)

高空間周波数 (1辺24素子)

多段階の補償

波面センサの開発

Tweeter → 位相(/振幅)計測

まとめ

- 0.1秒角、 10^7 のコントラストを達成するための、高空間周波数(24素子)、高頻度(5–10kHz)、高精度($\lambda/20$)のPDIセンサを定式化(今田+2015)。
- さらに高精度の複素振幅波面センサを構成、シミュレーションし、達成可能であることを確認した。→山本+2015

