

P.12 位相・振幅同時測定器

山本 広大 (京都大学)

松尾 太郎、木野 勝 (京都大学)

今田 大皓 (筑波大学)

波面測定センサ: 光学素子の形状測定や補償光学で重要。

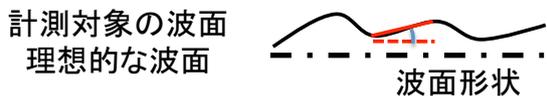
- ・高精度($1/20\lambda$)、高空間周波数(差し渡し32素子)、高頻度(>1kHz)の波面測定を目指す。
- ・波面の位相を直接測定。
- ・強度分布(ムラ)を測定。波面の情報量が増す。
- ・形状(位相)と同時に強度情報を得られる波面センサの性能をシミュレーションで評価

波面センサ(WFS)

- ・ 光学素子の形状計測・補償光学で**最も重要な要素**
- ・ 波面の「形状」を計測するか「位相」を測定するか。

WFS (波面センサ)による波面エラーの計測

A. 形状計測



理想的波面に対する形状計測。でも形状は直接計測できない

- ・ 傾斜は形状の1次微分 → 大
- ・ 曲率は形状の2次微分 → 変

B. 位相計測



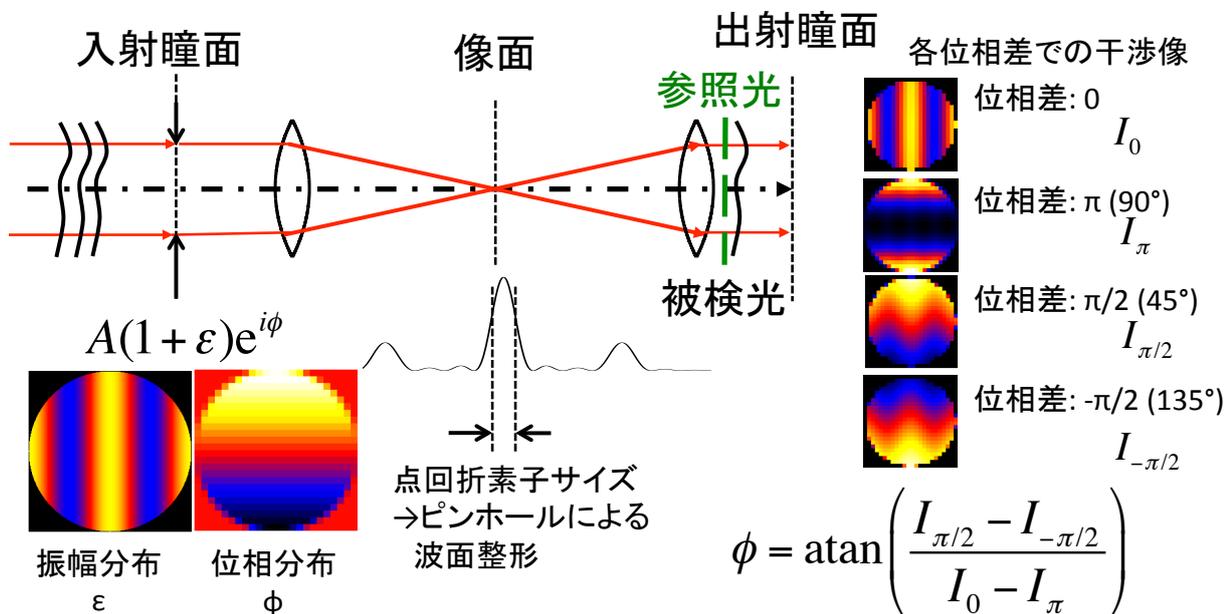
理想的な波面に対する波面の進み/遅れ(位相差)の直接計測

シャックハルトマンセンサ(Gemini/GPI)
曲率センサー(HiCIAO/AO188)etc...

ピラミッドセンサ(SCEXAO)
ツェルニケセンサ(Palomar)
点回折干渉計センサーetc...

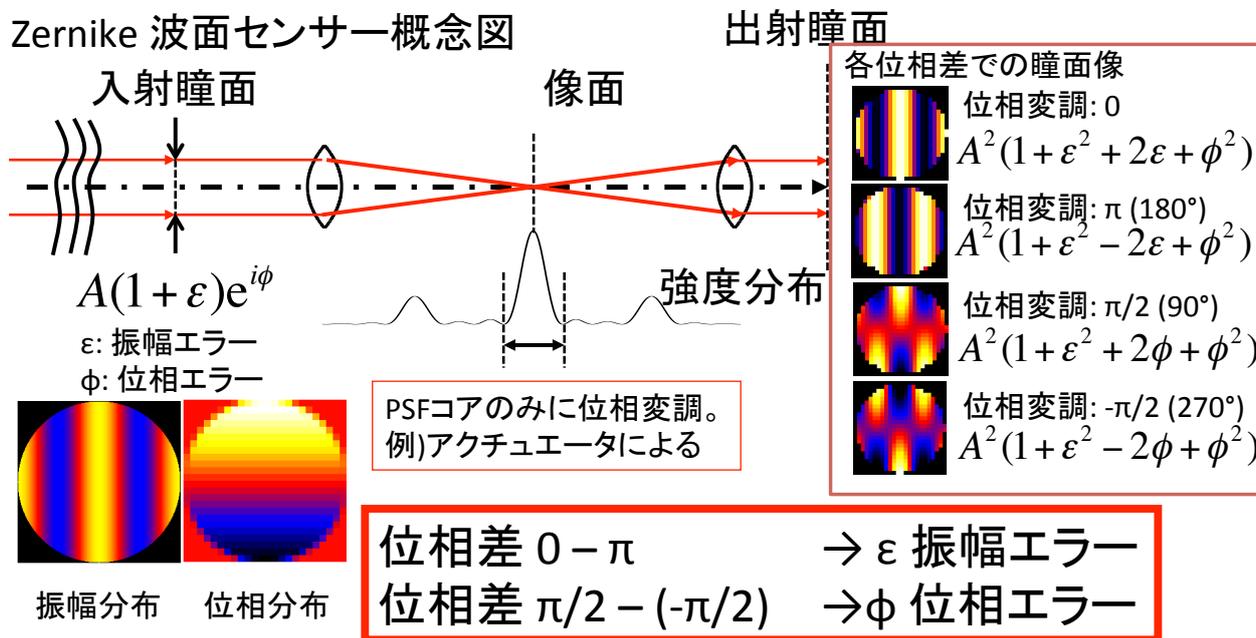
点源回折干渉計(PDI)

- 結像面の点回折素子で整形された参照光を生成。
- 被検光と参照光に位相差を与えて干渉させる。



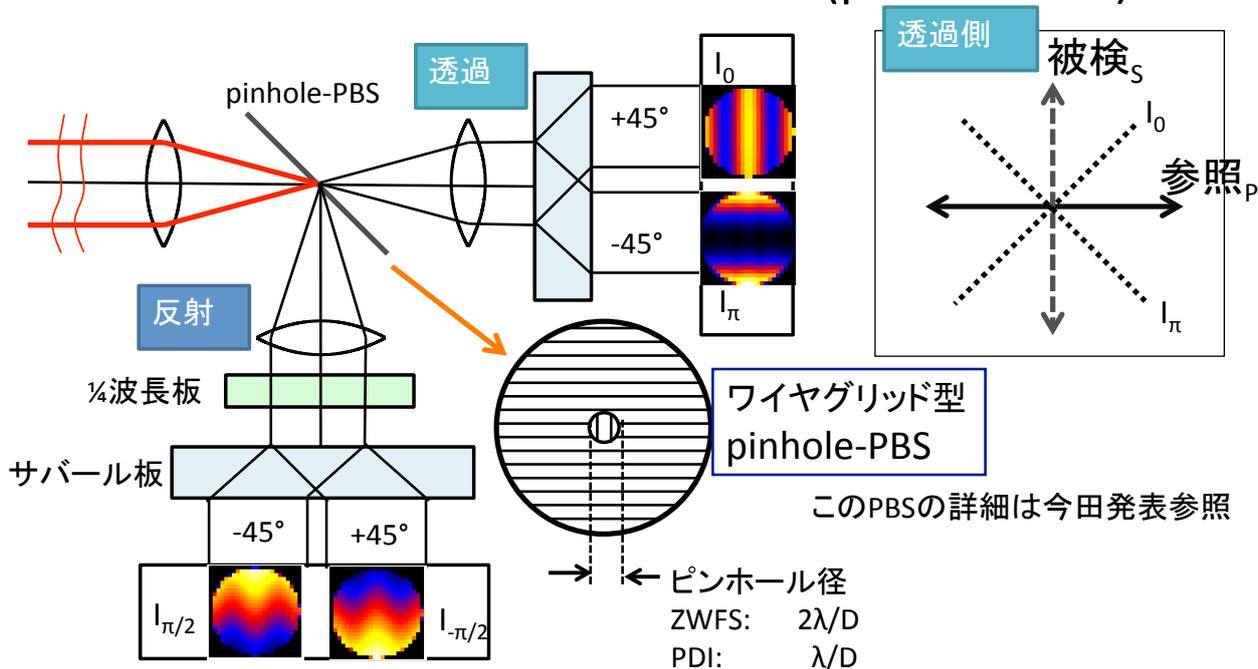
Zernike波面センサ(ZWFS)

- Zernikeが開発した位相差顕微鏡を改良。
- PSFコアに位相差(0° , 180° , 90° , 270°)を与える。



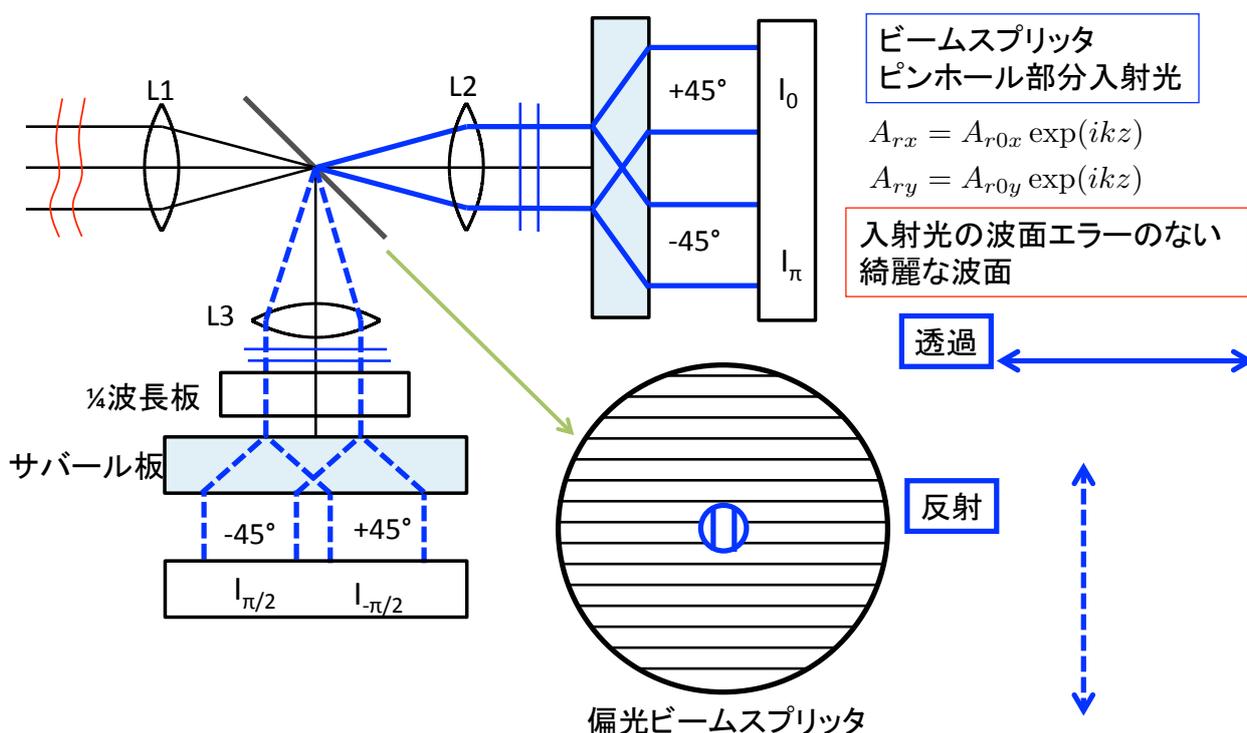
各位相差画像の同時測定

- 高周波(>1kHz)測定のために各位相差の同時測定。
- ピンホール偏光ビームスプリッタ(pinhole-PBS)使用



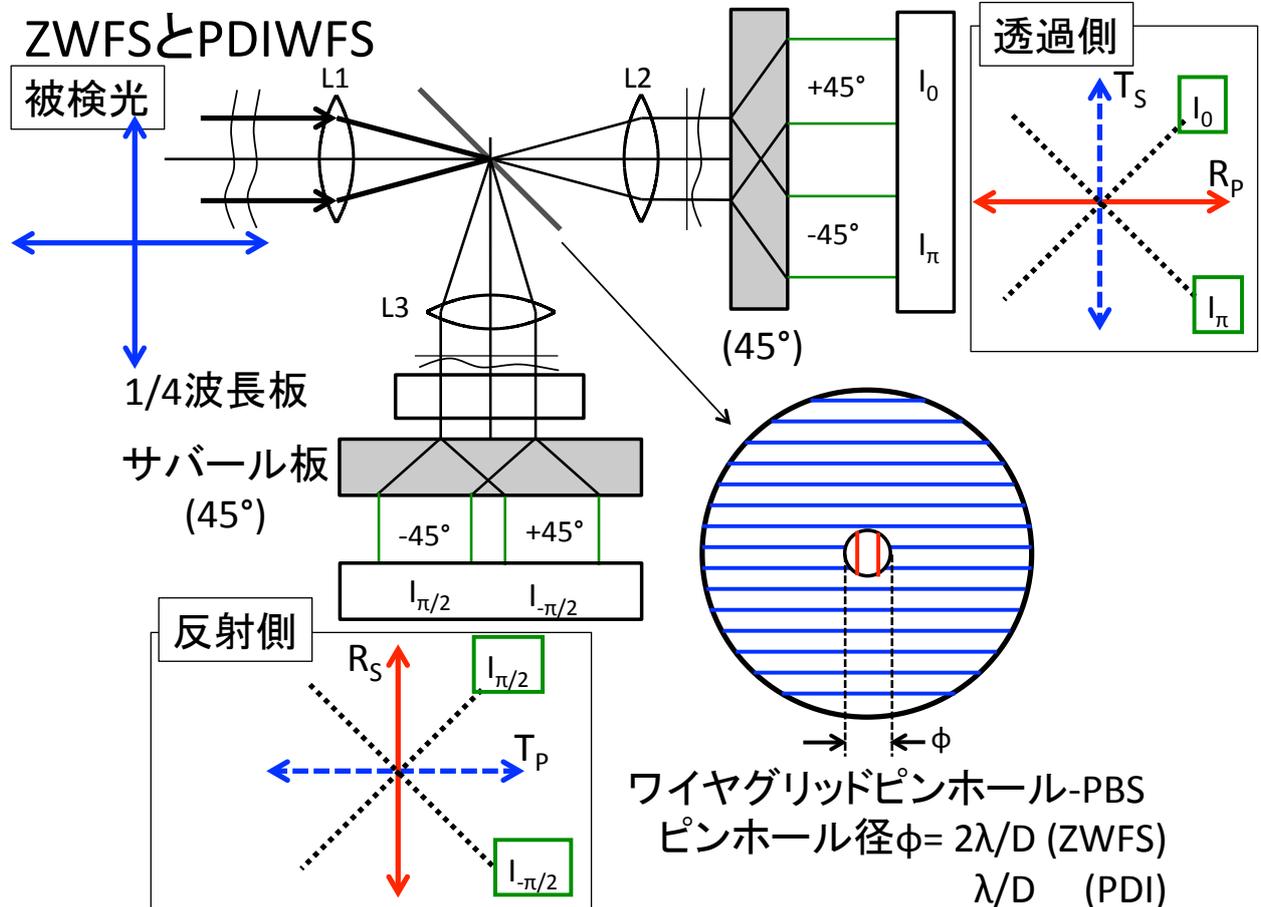
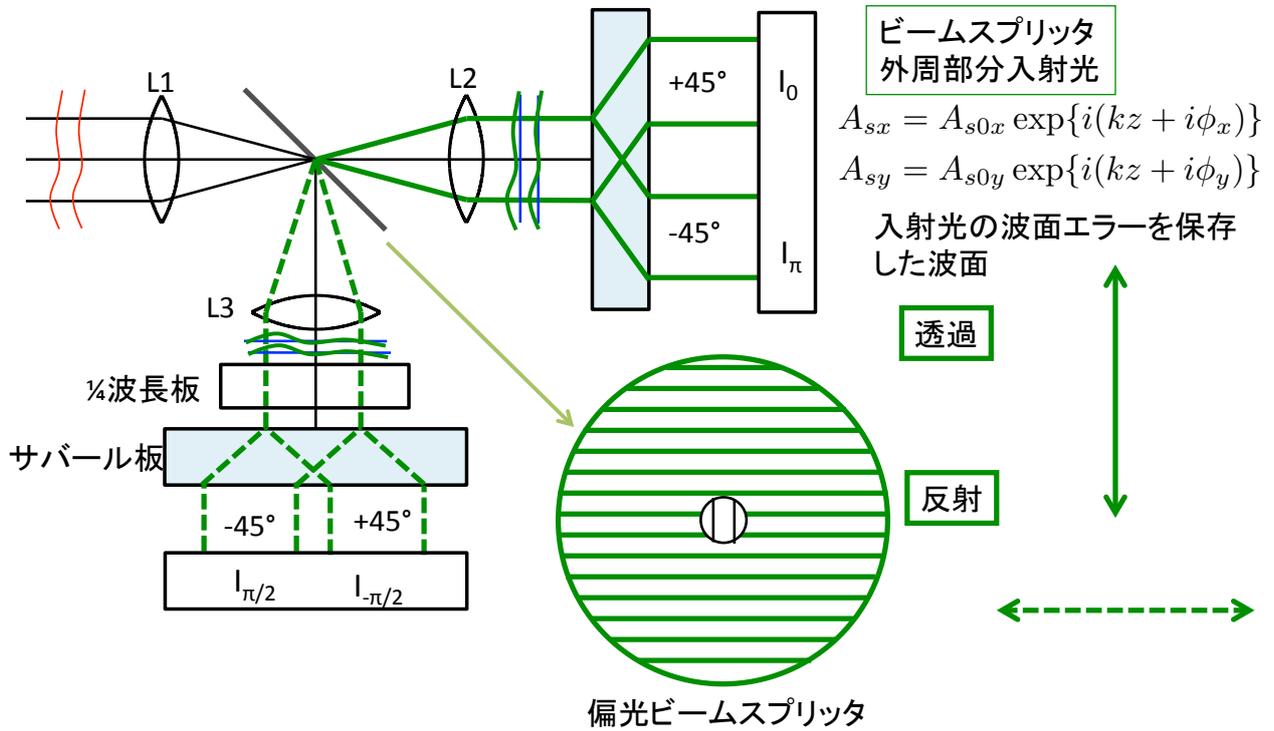
位相瞬時測定(参照光)

- ビームスプリッタのピンホールに入射する光



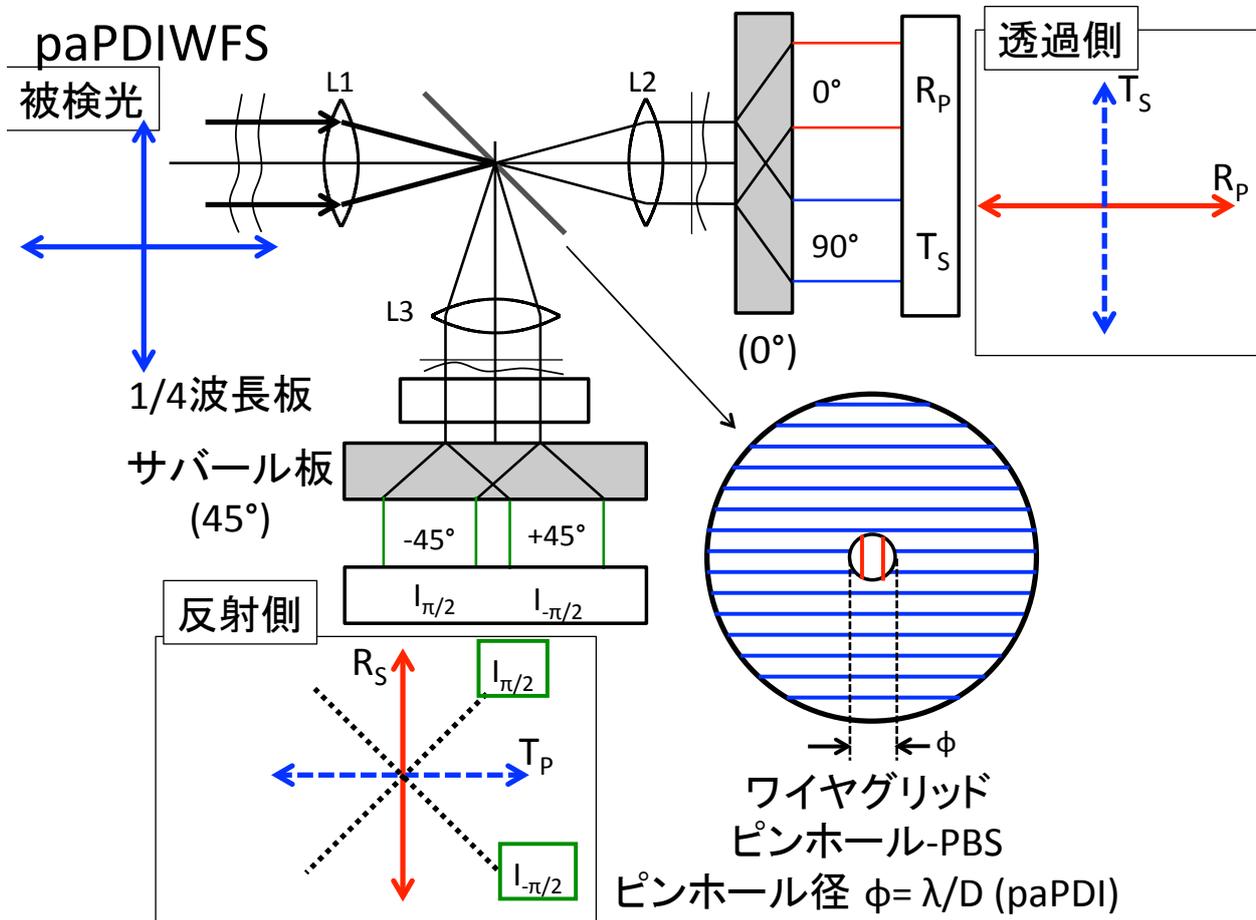
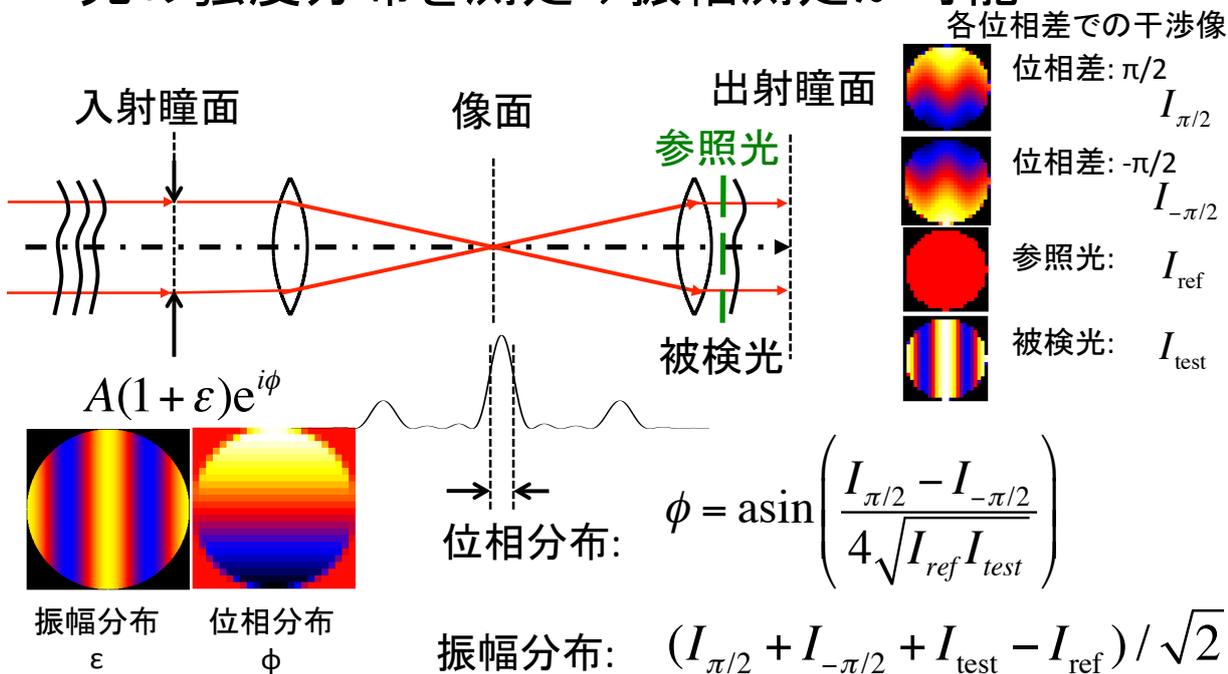
位相瞬時測定(被検光)

- ビームスプリッタの外周部分に入射する光



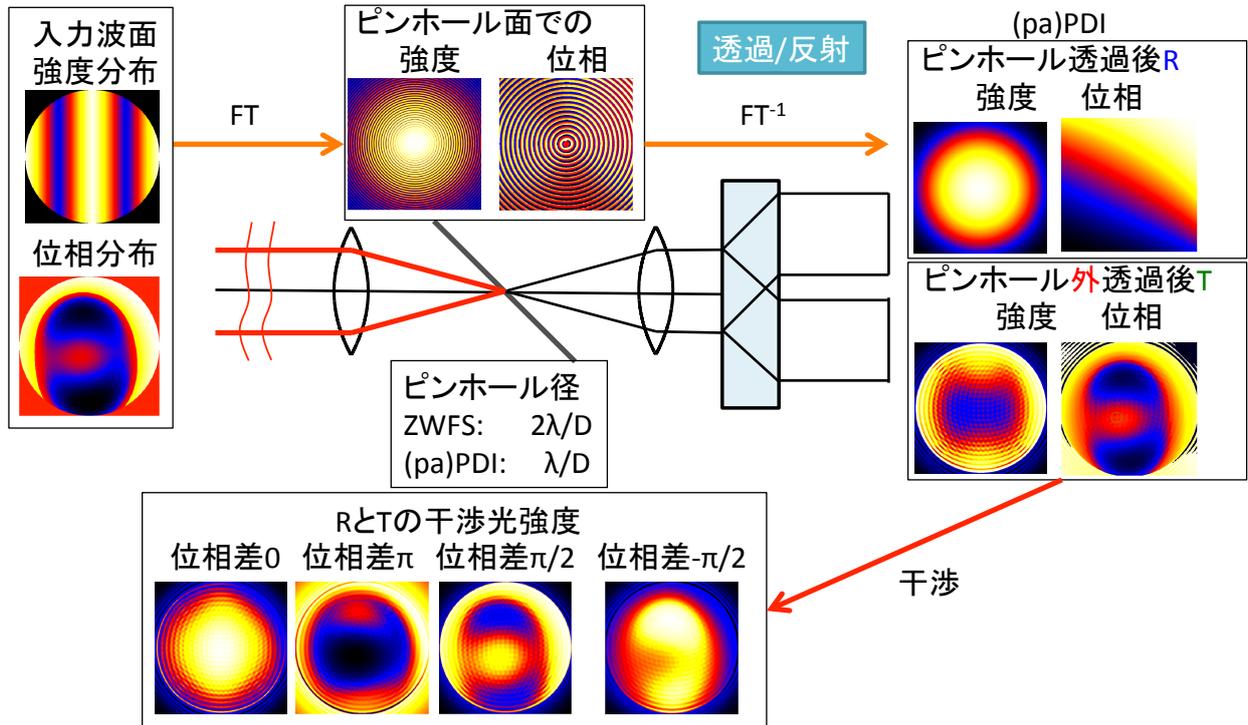
位相振幅同時測定PDI(paPDI)

- PDIの0, π 位相差の干渉の代わりに参照光、被検光の強度分布を測定→振幅測定が可能



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 収差の各モード

$$\phi(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} a_{nm} Z_n^m(\rho, \theta)$$

測定: PDIWFS

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_{\pi/2}(x, y) - I_{-\pi/2}(x, y)}{I_0(x, y) - I_{\pi}(x, y)} \right)$$

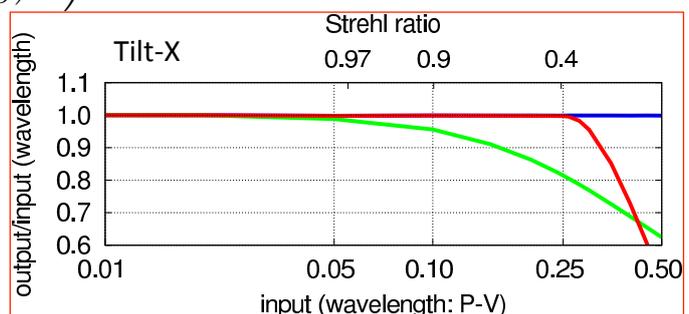
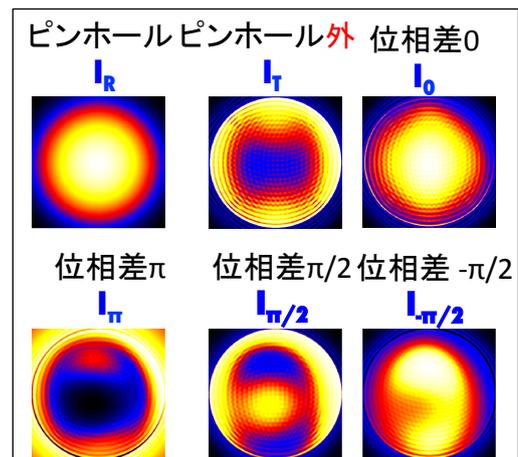
: paPDIWFS

$$\phi(x, y) = \sin^{-1} \left(\frac{I_{\pi/2}(x, y) - I_{-\pi/2}(x, y)}{4\sqrt{I_T(x, y)I_R(x, y)}} \right)$$

: ZWFS

$$\phi(x, y) = \frac{I_{\pi/2}(x, y) - I_{-\pi/2}(x, y)}{4A_0^2}$$

- 各WFSの、各モードでの振る舞いは同じ
- paPDIは $-\lambda/4 : \lambda/4$ で高精度測定可能
- ZWFSは $-\lambda/20 : \lambda/20$ 。
- ZWFSは[変動の大きさ $\ll 1$]



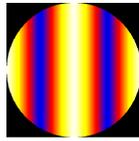
性能評価シミュレーション2. 強度測定

- 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

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

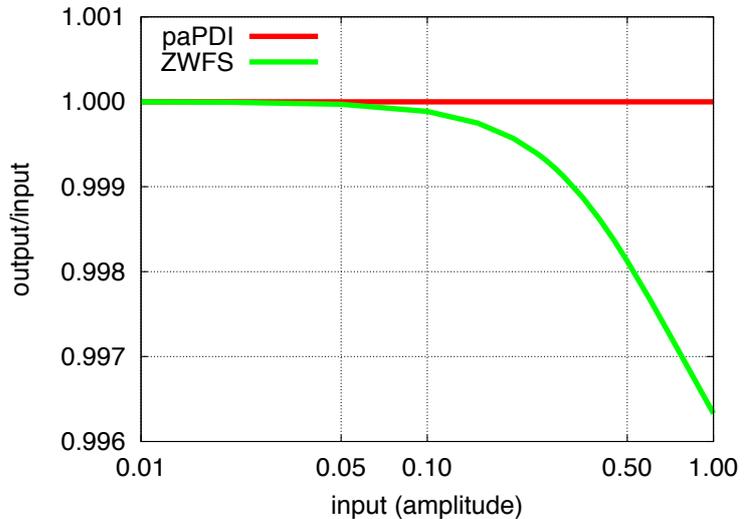
測定: paPDIWFS



$$|A_0|^2 \{1 + \varepsilon(x, y)\}^2 = \frac{1}{2} (I_{\pi/2} + I_{-\pi/2} + I_T - I_R)$$

: ZWFS

$$\varepsilon(x, y) = \frac{I_0(x, y) - I_{\pi}(x, y)}{4A_0^2}$$

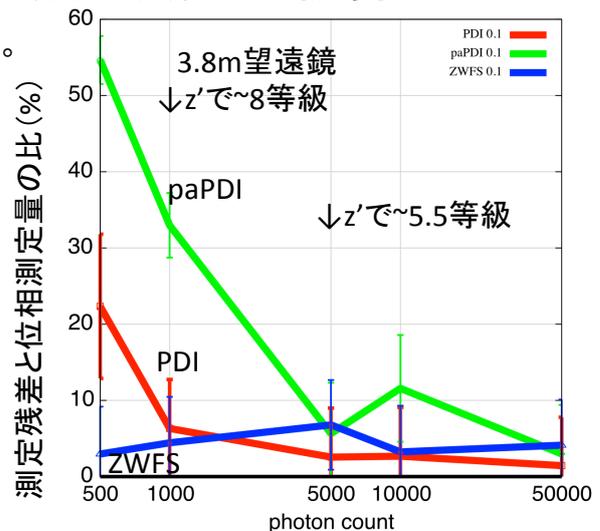
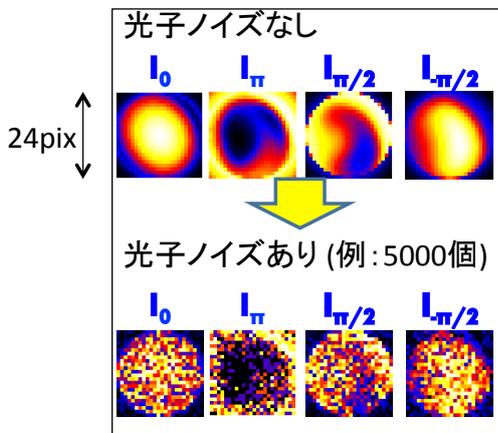


- paPDIは直接振幅を測定しているため、感度が入力に依存しない。
- ZWFSは[変動の大きさ << 1]。

性能評価シミュレーション3. フォトンノイズ

- 入射波の光子数の影響 → 動作限界等級算出

[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。



$$\phi = \frac{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}{4A_0^2} \quad \text{測定}$$

$$= \frac{I + \delta I}{I_0 + \delta I_0} = \frac{I}{I_0} + \frac{1}{I_0} \frac{I}{I_0} \delta I_0 + \frac{1}{I_0} \delta I$$

元々の振幅 I_0 にエラーがない場合(ZWFSの想定)

$$= \frac{I}{I_0} + \frac{1}{I_0} \sqrt{I_0} = \frac{I}{I_0} + \frac{1}{\sqrt{I_0}}$$

(paPDIの想定)

$$\delta\phi = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\beta_p}{\sqrt{N_{\text{photon}}}} \quad \text{Guyon2005} = \frac{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}{4\sqrt{I_T I_R}} = \frac{I}{I_0} + \frac{1}{\sqrt{I_0}} \frac{I}{I_0} + \frac{1}{\sqrt{I_0}}$$

性能評価シミュレーション3. フォトンノイズ

- 入射波の光子数の影響 → 動作限界等級算出

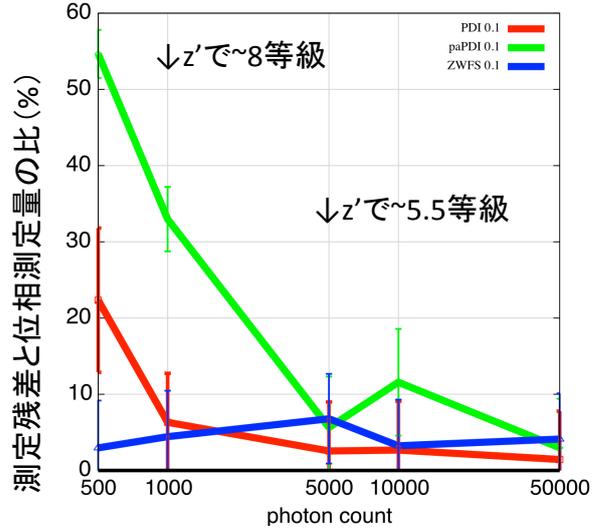
$$\text{paPDI} = \frac{I_{\frac{\pi}{2}} - I_{-\frac{\pi}{2}}}{4\sqrt{I_T I_R}}$$
 ほぼ1ピクセルに1個なので、 $l=0$ のピクセルが多い。

$$\text{ZWFS} = \frac{I_{\frac{\pi}{2}} - I_{-\frac{\pi}{2}}}{4A_0^2}$$
 ZWFSは和なので、 $l=0$ になっているピクセルの影響が小

$$|A_0|^2 = \frac{I_0 + I_{\pi} + I_{\frac{\pi}{2}} + I_{-\frac{\pi}{2}}}{4}$$

$$\delta\phi = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\beta_p}{\sqrt{N_{\text{photon}}}}$$
 Guyon2005

PDI: $\beta_p=2$
 ZWFS: $\beta_p=1$
 paPDI: $\beta_p = \text{光子数} \cdot \text{収差の大きさで変動}$



現在検討中。。。。

まとめ

- 位相と振幅を測定出来る波面センサを提案した。
- 測定原理の実証ができた。
- シミュレーションにより、光子ノイズの影響を評価した。
 - PDI, r-ZWFSは先行研究と矛盾がない。
 - paPDIはまだ検討が不十分。。。

	位相測定レンジ(P-V)	測定可能なStrehl比	振幅測定	光子ノイズの影響	特色
ZWFS	$\pm\lambda/10, \pm\pi/5$	>90%	$\ll 1$	ほぼ無し	簡単な計算で位相・振幅を導出出来る。
paPDI	$\pm\lambda/4, \pm\pi/2$	>40%	制限無し		低Strehl比でも測定出来る。

