

リアルタイム点回折干渉計とその解析的な性能評価

今田 大皓 (筑波大学), 松尾 太郎, 山本 広大, 木野 勝 (京都大学)

2015年度岡山ユーザーズミーティング (第26回光赤外ユーザーズミーティング)

偏光ビームスプリッタを用いた新しい点回折干渉計を提案する。ここで提案する系は偏光ビームスプリッタによって分けられた全ての偏光を計測に用い、4つの干渉像を同時に取得し、高い効率を達成する。また、波面の位相と測定量を結びつける解析的な表示も得た。ピンホールが有限の大きさを持つことによる効果を陽に示すことができた。従来の推定に用いられていた表式では位相を見誤る可能性のあることが明らかになった。

1. はじめに

波面計測は光学素子の性能評価や補償光学にとって必要不可欠な技術である。様々な方式がこれまでに提案されてきたが、その中でもコモンパス干渉計に分類される点回折干渉計 (PDI) は、振動環境のような不安定な環境でも高精度計測できるシステムと考えられている。

[1]では偏光を利用して、4つの干渉像を同時に取得するPDIを構築し、波面の実測に成功している。しかし、[1]のシステムは計測に利用せず捨ててしまっている偏光成分があり、効率に改善の余地がある。また、PDI一般に対して、性能を解析的に予想することはほとんどなされておらず、数値計算に頼ることが圧倒的に多い。

本ポスターでは、光学系に入射したエネルギーをできる限り測定に利用できる高効率の測定系を提案し、また解析的な性能評価を行なう。[2]に基づいて議論する。

2. 解析する系

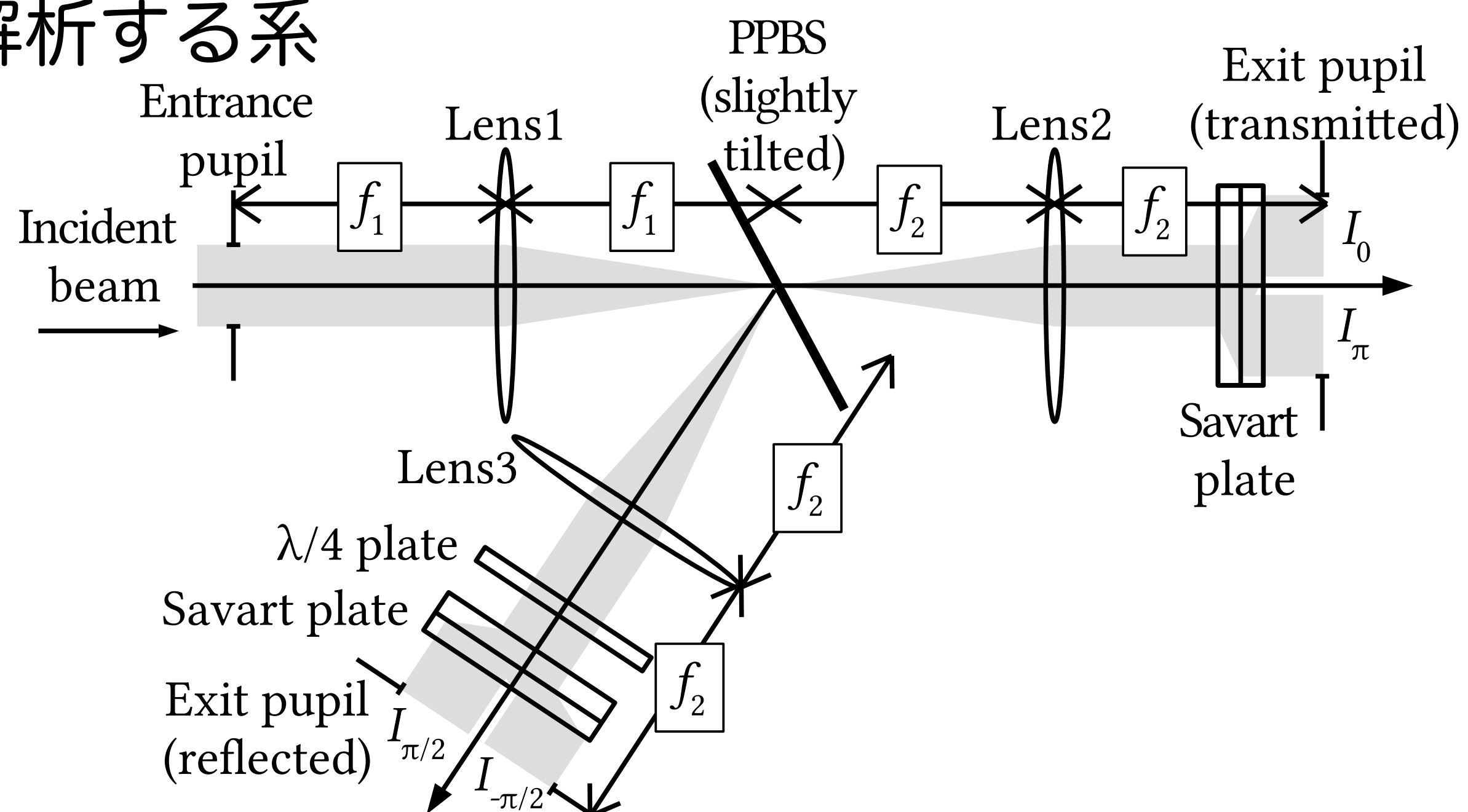


図1 提案するPDIの模式図。焦点面の偏光ビームスプリッタ (PPBS) を透過したビームと反射したビームの両方を用いる。透過 (反射) 後に瞳を再構築し、干渉像を同時に取得する。

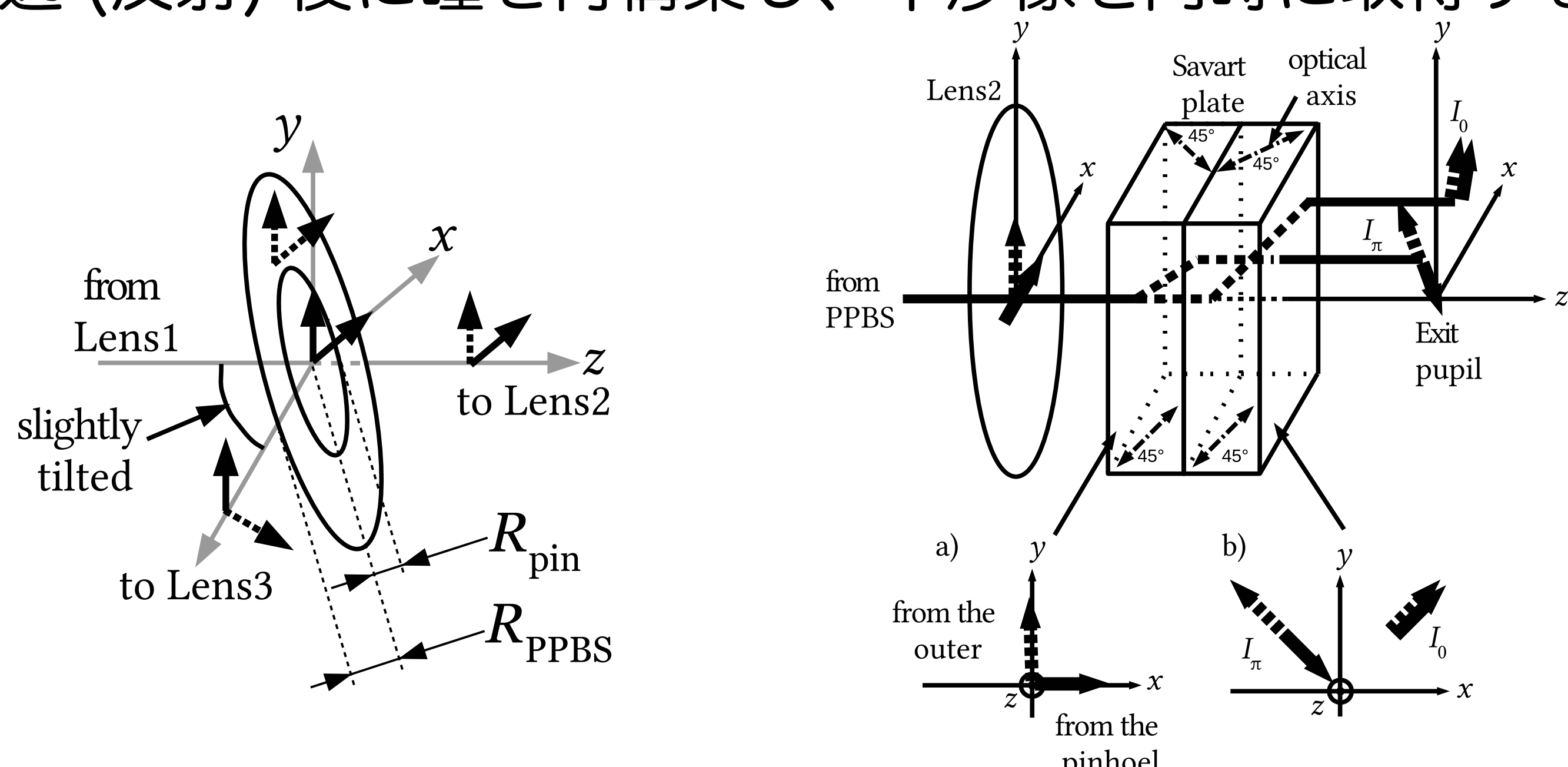


図2 PPBSの詳細 (左) とサバル板の光学軸の向き。PPBSの中心部のPSFより小さい領域は周囲と異なる偏光を透過 (反射) させるようにしておく。

3. 仮定

入射電場を次のように仮定する。

$$\vec{E}_1(x_1, y_1; t) = \begin{pmatrix} E_x \exp[i\delta(x_1, y_1; t)] \\ E_y \exp[i\delta(x_1, y_1; t)] \end{pmatrix}$$

$\delta(x_1, y_1; t) = 0$, (x_1, y_1) は入射瞳上の座標である。PPBSの透過率、反射率を次のように仮定する。

$$T(r_{PPBS}) = \begin{cases} \begin{pmatrix} T_x & 0 \\ 0 & T_y \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} T_y & 0 \\ 0 & T_x \end{pmatrix} \\ \text{null matrix} \end{cases}, R(r_{PPBS}) = \begin{cases} \begin{pmatrix} R_x & 0 \\ 0 & R_y \end{pmatrix} \text{ (ピンホール内)} \\ \begin{pmatrix} R_y & 0 \\ 0 & R_x \end{pmatrix} \text{ (ピンホール外)} \\ \text{null matrix} \text{ (PPBS外)} \end{cases}$$

4. 解析解

干渉像の差の比を計算すると、解析的に以下のように書ける。計算の詳細は[2]に委ねる。

$$\frac{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}{I_0 - I_\pi} = \frac{C \sin \delta}{\cos \delta + D} = M, C = \frac{|R_x|^2 - |R_y|^2}{|T_y - T_x|^2}$$

C はPPBSの偏光特性のみで決まるパラメータ、 D はピンホールが有限の大きさを持つことに起因する項である。図3(a)に、ピンホールの半径に対して $-D$ をプロットした。

従来、波面の推定に用いられていた式は

$$\delta_{\text{rec}} = \tan^{-1} \frac{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}{I_0 - I_\pi}$$

であるが、実際には C, D の効果により

$$\delta = \begin{cases} \sin^{-1} \frac{DM}{\sqrt{C^2 + M^2}} + \tan^{-1} \frac{M}{C} \\ \pi - \sin^{-1} \frac{DM}{\sqrt{C^2 + M^2}} + \tan^{-1} \frac{M}{C} \end{cases}$$

が正しい表式となる。 $+\arcsin$ の式は $\cos\delta + D > 0$ または $\cos\delta + 1/D > 0$, $-\arcsin$ の式はそれ以外の場合である。 $C=1, D=0$ のときに $\delta = \delta_{\text{rec}}$ となる。図3(b)にピンホールの半径に対して $\delta_{\text{rec}}/\delta$ を示す。図4に応答曲線を示す。

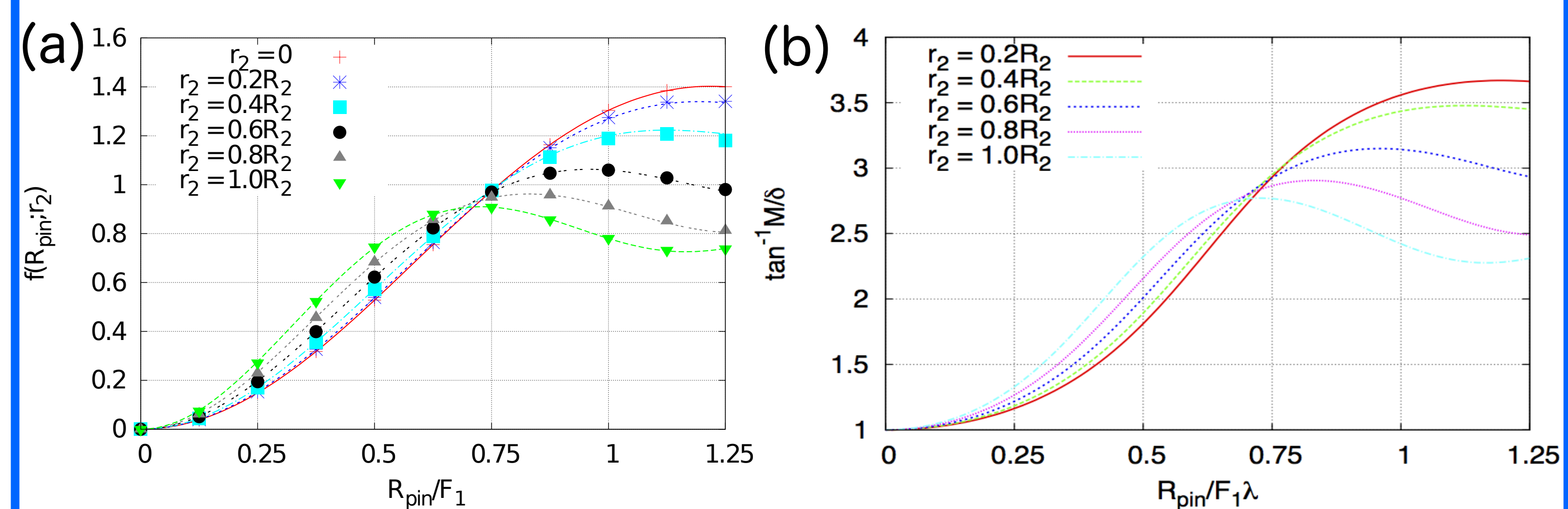


図3 ピンホール半径に対する値の変化。 R_2 は瞳半径、 r_2 は瞳中心からの距離である。(a) $f=-D$ の変化。有限の大きさのピンホールの寄与を示す。(b) $\delta_{\text{rec}}/\delta$ の変化。

$C=1, \delta = \lambda/10$ を仮定。

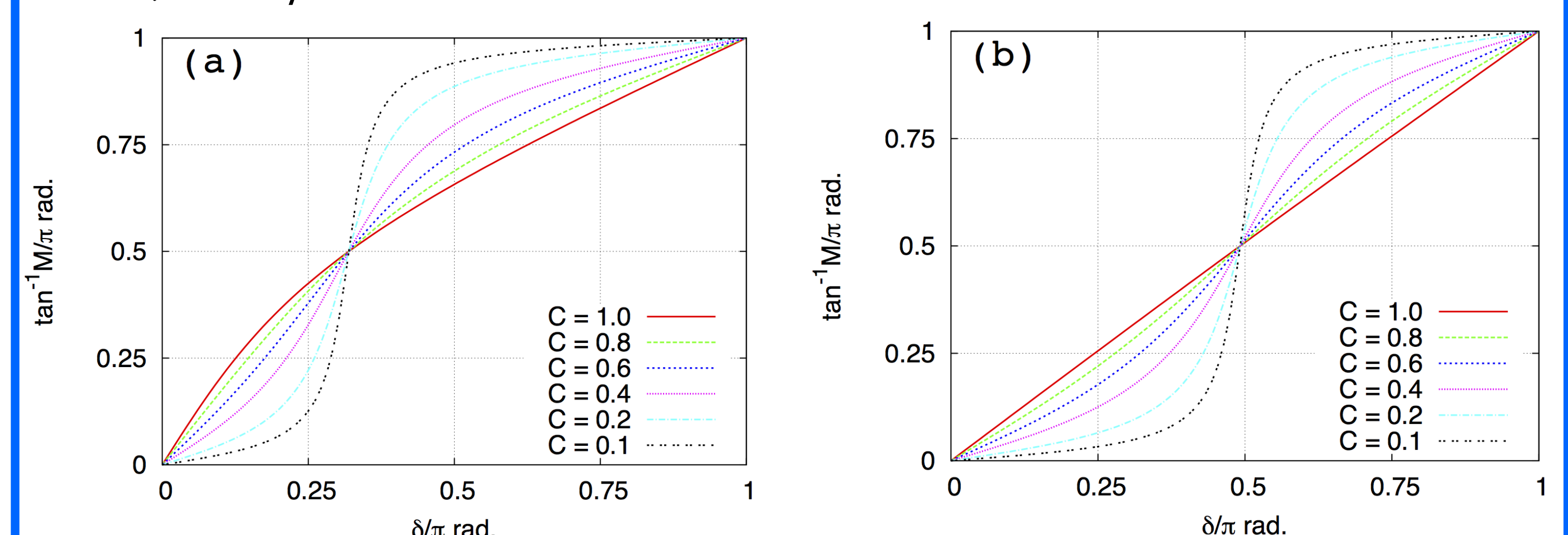


図4 横軸に入射波面エラー、縦軸に δ_{rec} を取った応答曲線。 $r_2 = 0.2R_2$ を仮定。(a) $R_{\text{pin}} = 0.1F_1\lambda$. (b) $R_{\text{pin}} = 0.5F_1\lambda$.

references

[1] Millerd et al., Proc. of SPIE, vol. 5531, p.p. 264-272 (2004)

[2] Imada et al., Applied Optics, accepted (2015)