

Wavefront Sensor 法による三角共振器のミスアラインメント検出

齊藤高大

新潟大学大学院 自然科学研究科 電気情報工学専攻 博士後期課程 2年

2014年 8月 6日

1 はじめに

Input Mode Cleaner(IMC)は、Fig.1 に示すような三角共振器である。懸架鏡の共振などにより、IMC を構成する各ミラーが角度変化を起こすと、入射光軸と共振器軸との間にずれが生じる。このずれを Wavefront sensor 法(WFS)を用いて検出する。WFS 信号の検出は、QPD-REFL(REFL)と QPD-TRANS(TRANS)の2つで行う。ミスアラインメントが生じたときに、それぞれの QPD で得られる WFS 信号について考えていく。

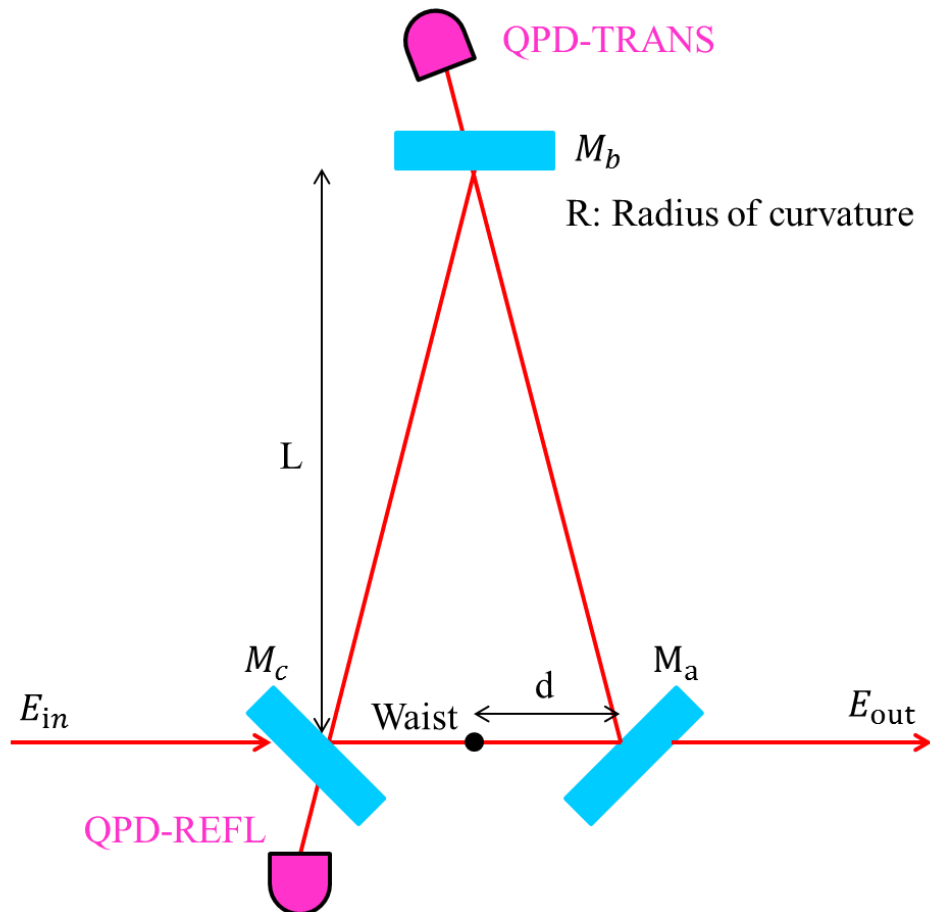


Fig.1 Input Mode Cleaner

2 Hermite-Gaussian モード

2-1 Hermite-Gaussian モード

自由空間を伝搬するレーザ光は次のような Hermite-gaussian Modes を持つ光波として扱うことができる。

$$U_{lm}(x, y, z) \equiv U_l(x, z)U_m(y, z) \exp j\{-kz + (l + m + 1)\eta(z)\} \quad (2.1)$$

ここで、

$$U_l(x, z) \equiv \left(\frac{2}{\pi w(z)^2}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{l! 2^l}\right)^{\frac{1}{2}} H_l\left(\frac{\sqrt{2}x}{w(z)}\right) \exp\left\{-\left(\frac{x}{w(z)}\right)^2 - j\frac{k}{2R(z)}x^2\right\} \quad (2.2)$$

であり、各記号は、

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} : \text{ビーム半径} \quad (2.3)$$

$$R(z) = \frac{z^2 + z_0^2}{z} : \text{波面の曲率半径} \quad (2.4)$$

$$z_0 = \frac{kw_0^2}{2} \quad (2.5)$$

$$\eta(z) = \arctan \frac{z}{z_0} : \text{Gouy Phase} \quad (2.6)$$

$$H_l : \text{Hermite 多項式} \\ H_0(x) = 1, H_1(x) = 2x \quad (2.7)$$

とする。

例えば、ウエスト $z=0$ において(2.2)は、0次と1次について、

$$U_0(x, 0) \cong \left(\frac{2}{\pi w_0^2}\right)^{\frac{1}{4}} \exp\left\{-\left(\frac{x}{w_0}\right)^2\right\} \quad (2.8)$$

$$U_1(x, 0) \equiv \left(\frac{2}{\pi w_0^2}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{2x}{w_0} \exp\left\{-\left(\frac{x}{w_0}\right)^2\right\} \quad (2.9)$$

と表すことができる。

2-2 Hermite-Gaussian モードの平行移動と回転

次に、00 モードが x 軸方向に δx だけ平行移動したとき、どのように展開されるかを示す。 x 方向に δx だけ平行移動した座標系を (x', y', z') とする。ウェストの位置について考えると、00 モードは、

$$U_{00}(x, y, 0) \cong U_{00}(x', y', 0) + \left(\frac{\delta x}{w_0}\right) U_{10}(x', y', 0) \quad (2.10)$$

のように展開される。

次に 00 モードが y 軸を中心に $\delta\theta$ 回転したとき、どのように展開されるかを示す。 y 軸を中心に $\delta\theta$ 回転した座標系を (x', y', z') とする。ウェストの位置について考えると、00 モードは、

$$U_{00}(x, y, 0) \cong U_{00}(x', y', 0) + i \left(\frac{\delta\theta}{\alpha_0}\right) U_{10}(x', y', 0) \quad (2.11)$$

のように展開される。

ここで、 α_0 はビームの広がり角であり、

$$\alpha_0 = \frac{2}{kw_0} \quad (2.12)$$

である。

3 三角共振器の反射係数

入射光軸と共振器軸が一致している場合の振幅反射率を 0 次と 1 次のモードについてまとめる。[1]

00 モードが三角共振器を 1 周するときの位相変化を φ とすると、三角共振器の 00 モードに対する振幅反射率は、

$$r_{c0} = -r_F + \frac{t_F^2 r_E e^{i\varphi}}{1 - r_F r_E e^{i\varphi}} \quad (3.1)$$

10 モードの場合は 00 モードと Gouy phase だけ位相が異なる。三角共振器を 1 周して進む Gouy phase を η とすると、

$$r_{c1} = -r_F + \frac{t_F^2 r_E e^{i(\varphi+\eta)}}{1 - r_F r_E e^{i(\varphi+\eta)}} \quad (3.2)$$

4 ミスアラインメントによるウェスト周りの光軸の変化

Fig4.1 に示すように、共振器を構成するミラーの角度変化は、水平方向(上図)と垂直方向(下図)に分けることができ、さらにそれぞれ3種類の角度変化に分けることができる。水平方向については、凹面ミラー M_b の角度変化 α_b 、1組の平面ミラー M_a, M_c の同相角度変化 α_+ 、差動角度変化 α_- であり、垂直方向については、凹面ミラー M_b の角度変化 β_b 、1組の平面ミラー M_a, M_c の同相角度変化 β_+ 、差動角度変化 β_- のように分けられる。[2]

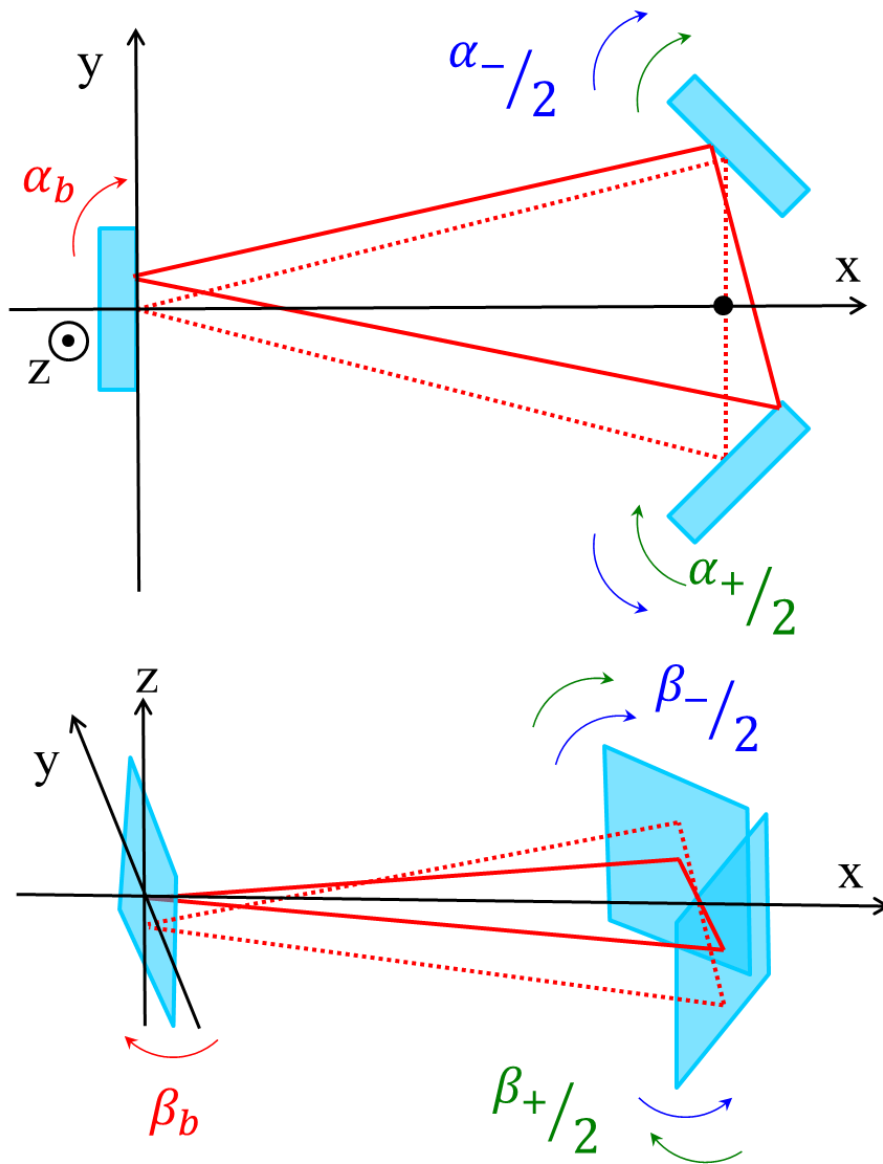


Fig.4.1 ミスアラインメント時の共振器軸の変化

三角共振器の各ミラーにそれぞれの角度変化が生じたときに、入射光軸に対して共振器軸がウェスト周りで、どのように平行移動、回転するかを Table.4.1 にまとめた。

Table.4.1 ウェスト周りの入射光軸に対する共振器軸の変化

Direction	Cause	δx	δz	$\delta\theta_x$	$\delta\theta_z$
Horizontal	α_b	0	0	$-\frac{R}{(R-L-d)}\alpha_b$	0
	α_+	0	0	$-\frac{R-L}{(R-L-d)}\alpha_+$	0
	α_-	$-\sqrt{L^2+d^2}\alpha_-$	0	0	0
Vertical	β_b	0	$-\beta_b R$	0	0
	β_+	0	0	0	$\frac{\beta_+}{\sqrt{2}}$
	β_-	0	0	0	$-\frac{\beta_-}{\sqrt{2}}$

5 REFL で得られる WFS 信号

各ミラーの角度変化によって生じる入射光軸に対する共振器軸のウェスト周りでの平行移動を δx 、回転 $\delta\theta$ とすると、REFL で得られる WFS 信号は、[1]

$$P_{WFS} = -\sqrt{\frac{8}{\pi}} P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) U_1^* U_0^* U_0 U_0 (r_{c0} r_{s1} - r_{c1} r_{s0}) \left(\frac{\delta x}{w_0} \sin \eta - \frac{\delta \theta}{\alpha_0} \cos \eta \right) \quad (5.1)$$

となる。

式(5.1)から分かるように、入射光軸に対して、共振器軸がウェスト周りで δx 平行移動したとき、WFS 信号強度は、

$$P_{displacement} \propto \frac{\delta x}{w_0} \sin \eta(z) \quad (5.2)$$

となり、 $\sin \eta(z)$ に比例する。

また、入射光軸に対して、共振器軸がウェスト周りで $\delta\theta$ 回転したとすると、WFS 信号強度は、

$$P_{tilt} \propto -\frac{\delta \theta}{\alpha_0} \cos \eta(z) \quad (5.3)$$

となり、 $\cos \eta(z)$ に比例する。

Table4.1、(5.1)を用いて、REFL で得られる WFS 信号の Gouy 位相依存性を、水平方向については、Fig.5.1 に、垂直方向については、Fig.5.2 に示した。計算に必要なパラメータは Table5.1 を用いた。

Table5.1 : 計算に使用したパラメータ

Cause	Value
L	26.4(m)
D	0.25(m)
R	37.3(m)
w_0	2.4(mm)
α_0	1.4×10^{-4}

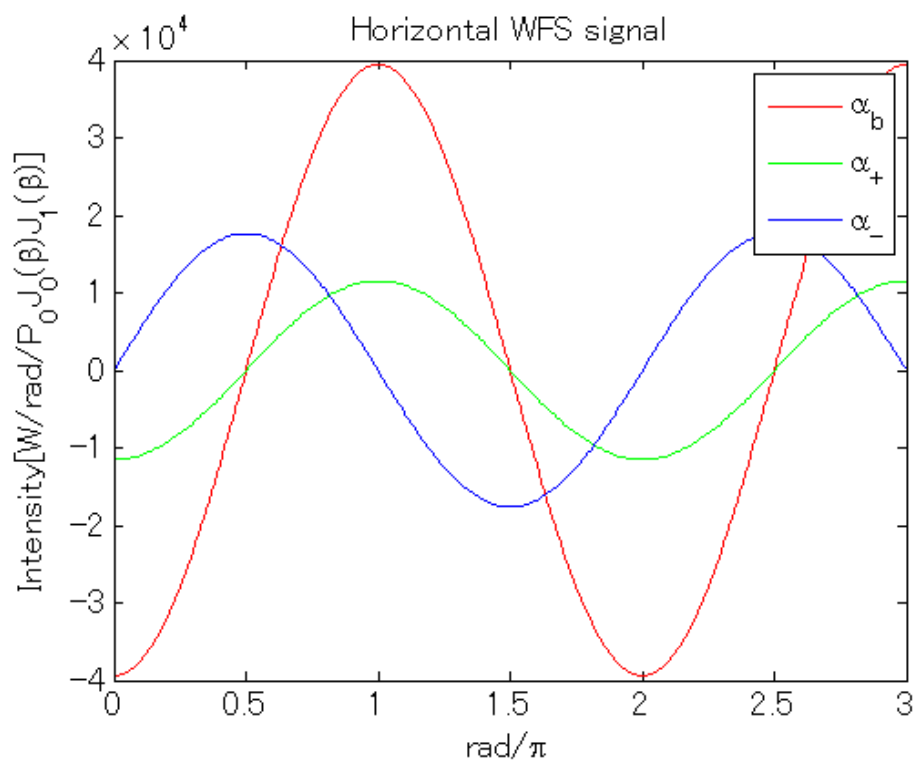


Fig.5.1 水平方向の WFS 信号強度の Gouy 位相依存性

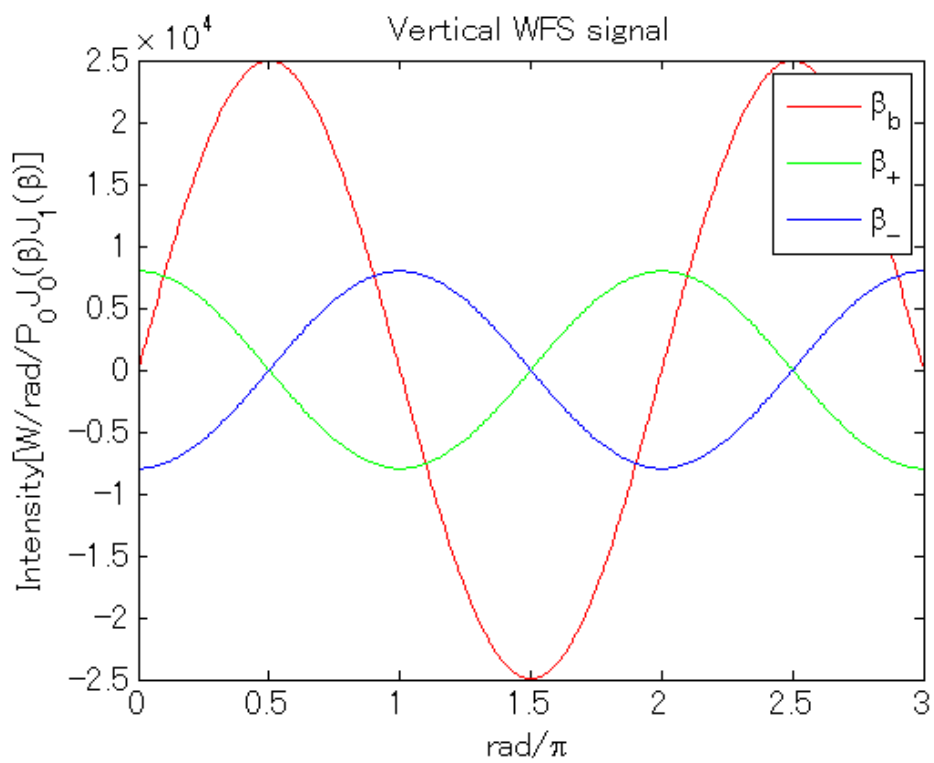


Fig.5.2 垂直方向の WFS 信号強度の Gouy 位相依存性

6 TRANS で得られる WFS 信号

TRANS で得られる WFS 信号を導出するために、Fig.6.1 のような実験系を考える。QPD は、入射光軸上のウェストの位置にあるとする。光軸に平行移動、回転が生じたときのウェストの位置にある QPD から出力される信号を考える。

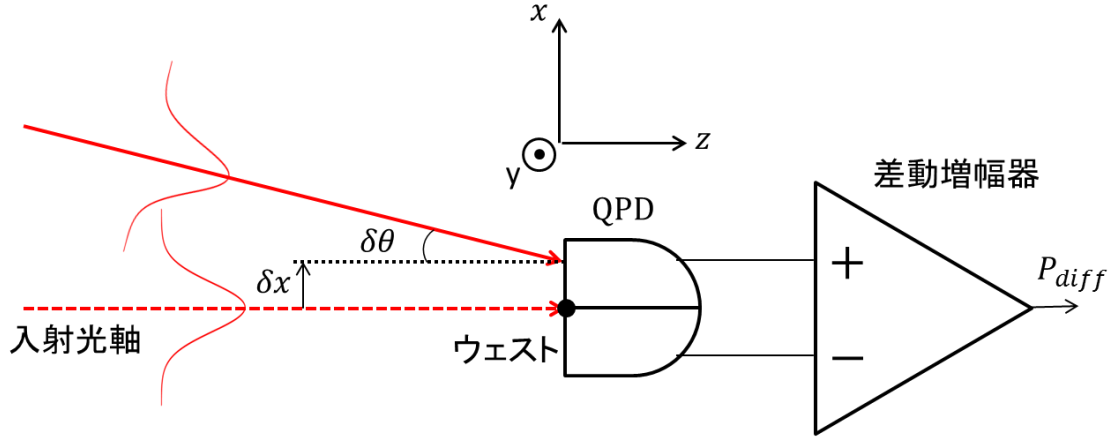


Fig.6.1 光軸のずれを検出する実験系

ウェストの位置での入射光軸の電場は、

$$E(x, y, 0) \cong U_{00}(x, y, 0)E_0 \quad (6.1)$$

ウェストの位置にある QPD 上で、ビームが x 軸方向に δx だけ平行移動しているとすると、QPD 上での強度分布は、式(2.10)より

$$\begin{aligned} P(x, y, 0) &= E_0^2 U_{00}(x - \delta x, y, 0) U_{00}^*(x - \delta x, y, 0) \\ &= P_0 \left(U_{00}(x, y, 0) + \frac{\delta x}{w_0} U_{10}(x, y, 0) \right) \left(U_{00}^*(x, y, 0) + \frac{\delta x}{w_0} U_{10}^*(x, y, 0) \right) \\ &= P_0 \left(U_{00}(x, y, 0) U_{00}^*(x, y, 0) + \left(\frac{\delta x}{w_0} \right)^2 U_{10}(x, y, 0) U_{10}^*(x, y, 0) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\delta x}{w_0} (U_{00}(x, y, 0) U_{10}^*(x, y, 0) + U_{00}^*(x, y, 0) U_{10}(x, y, 0)) \right) \end{aligned} \quad (6.2)$$

(6.2)式の第3項は、(2.1)を用いてまとめると、

$$\begin{aligned} &\frac{\delta x}{w_0} (U_{00}(x, y, 0) U_{10}^*(x, y, 0) + U_{00}^*(x, y, 0) U_{10}(x, y, 0)) \\ &= \frac{\delta x}{w_0} U_0(x, 0) U_1^*(x, 0) U_0(y, 0) U_0^*(y, 0) \{e^{-j\eta} + e^{j\eta}\} \end{aligned}$$

ここで、x-z 平面上での信号強度を考えるとすると、y=0 なので、

$$U_0(y, 0) = U_0^*(y, 0) = 1$$

である。したがって、(6.2)の第3項は、

$$\frac{2\delta x}{w_0} U_0(x, 0) U_1^*(x, 0) \cos \eta$$

となり、 $\cos \eta$ に比例した値になることが分かる。

したがって、QPD の $x > 0$ の領域と $x < 0$ の領域の強度の差は^{*1}、(2.8),(2.9)を用いて、

$$P_{diff} = P(x > 0) - P(x < 0)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{2\delta x}{w_0} P_0 \left(\int_0^\infty (U_0(x, 0) U_1^*(x, 0) \cos \eta) dx - \int_{-\infty}^0 (U_0(x, 0) U_1^*(x, 0) \cos \eta) dx \right) \\ &= \frac{4\delta x}{w_0} P_0 \int_0^\infty dx \sqrt{\frac{2}{\pi w_0^2}} \frac{2x}{w_0} \exp\left(-\frac{2x^2}{w_0^2}\right) \cos \eta \\ &= \sqrt{\frac{8 P_0 \delta x}{\pi w_0}} \cos \eta \end{aligned} \tag{6.3}$$

次に、ウェストの位置にある QPD 上で、ビームが y 軸を中心に $\delta\theta$ だけ回転しているとすると、QPD 上での強度分布は、(2.11)式より、

$$\begin{aligned} P(x, y, 0) &= E_0^2 U_{00}(x', y', 0) U_{00}^*(x', y', 0) \\ &= P_0 \left(U_{00}(x, y, 0) + i \left(\frac{\delta\theta}{\alpha_0} \right) U_{10}(x, y, 0) \right) \left(U_{00}^*(x, y, 0) - i \left(\frac{\delta\theta}{\alpha_0} \right) U_{10}^*(x, y, 0) \right) \\ &= P_0 \left(U_{00}(x, y, 0) U_{00}^*(x, y, 0) + \left(\frac{\delta\theta}{\alpha_0} \right)^2 U_{10}(x, y, 0) U_{10}^*(x, y, 0) \right. \\ &\quad \left. - i \frac{\delta\theta}{\alpha_0} (U_{00}(x, y, 0) U_{10}^*(x, y, 0) - U_{00}^*(x, y, 0) U_{10}(x, y, 0)) \right) \end{aligned} \tag{6.4}$$

¹ 次の関係を使用した。

$$\int_0^\infty x^{2n+1} e^{-ax^2} dx = \frac{n!}{2a^{n+1}}$$

ここで、(6.4)式の第3項は、(2.1),(2.2)式を用いてまとめると、

$$\begin{aligned} & -i \frac{\delta\theta}{\alpha_0} (U_{00}(x, y, 0)U_{10}^*(x, y, 0) - U_{00}^*(x, y, 0)U_{10}(x, y, 0)) \\ & = -i \frac{\delta\theta}{\alpha_0} U_0(x, 0)U_1^*(x, 0)U_0(y, 0)U_0^*(y, 0)\{e^{-j\eta} - e^{j\eta}\} \end{aligned}$$

ここで、x-z 平面上での信号強度を考えるとすると、y=0 なので、

$$U_0(y, 0) = U_0^*(y, 0) = 1$$

である。したがって、(6.2)の第3項は、

$$-2U_0(x, 0)U_1^*(x, 0) \sin \eta$$

となり、 $\sin \eta(z)$ に比例した値になることが分かる。

したがって、QPD の $x>0$ の領域と $x<0$ の領域の強度の差は、(2.8),(2.9)を用いて、

$$\begin{aligned} P_{diff} &= P(x > 0) - P(x < 0) \\ &= -\frac{2\delta\theta}{\alpha_0} P_0 \left(\int_0^\infty (U_0(x, 0)U_1^*(x, 0) \sin \eta) dx - \int_{-\infty}^0 (U_0(x, 0)U_1^*(x, 0) \sin \eta) dx \right) \\ &= -\frac{4\delta\theta}{\alpha_0} P_0 \int_0^\infty dx \sqrt{\frac{2}{\pi w_0^2}} \frac{2x}{w_0} \exp\left(-\frac{2x^2}{w_0^2}\right) \sin \eta \\ &= -\sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{P_0 \delta\theta}{\alpha_0} \sin \eta \end{aligned} \tag{6.5}$$

まとめると、TRANS で得られる信号は、(6.3),(6.5)を用いて、

$$P_{diff} = \sqrt{\frac{8}{\pi}} P_0 \left(\frac{\delta x}{w_0} \cos \eta - \frac{\delta\theta}{\alpha_0} \sin \eta \right) \tag{6.6}$$

となる。

7 ミスアラインメントによる Ma-Mb 光軸の変化

IMC では、TRANS を Ma と Mb のビームスポットを結んだ光軸の延長線上に設置し、6章で述べたような原理によって、ミスアラインメントによる光軸のずれを検出する。

次に、各ミラーの角度変化によって、TRANS では、どのような信号強度が得られるかを求めていく。式(6.3)、式(6.5)は、ウェストの位置を $\eta = 0$ とした時の WFS 信号強度であるので、IMC の各ミラーの角度変化によって、Ma-Mb 光軸上にあるウェストの位置が、どれだけ平行移動、回転するかを求める必要がある。しかし、ウェストは、Ma-Mc 光軸上にあるので、Fig7.1 のようにして、ウェストの位置を Ma-Mb 光軸上に折り返して、平行移動、回転の量を求めなければならない。

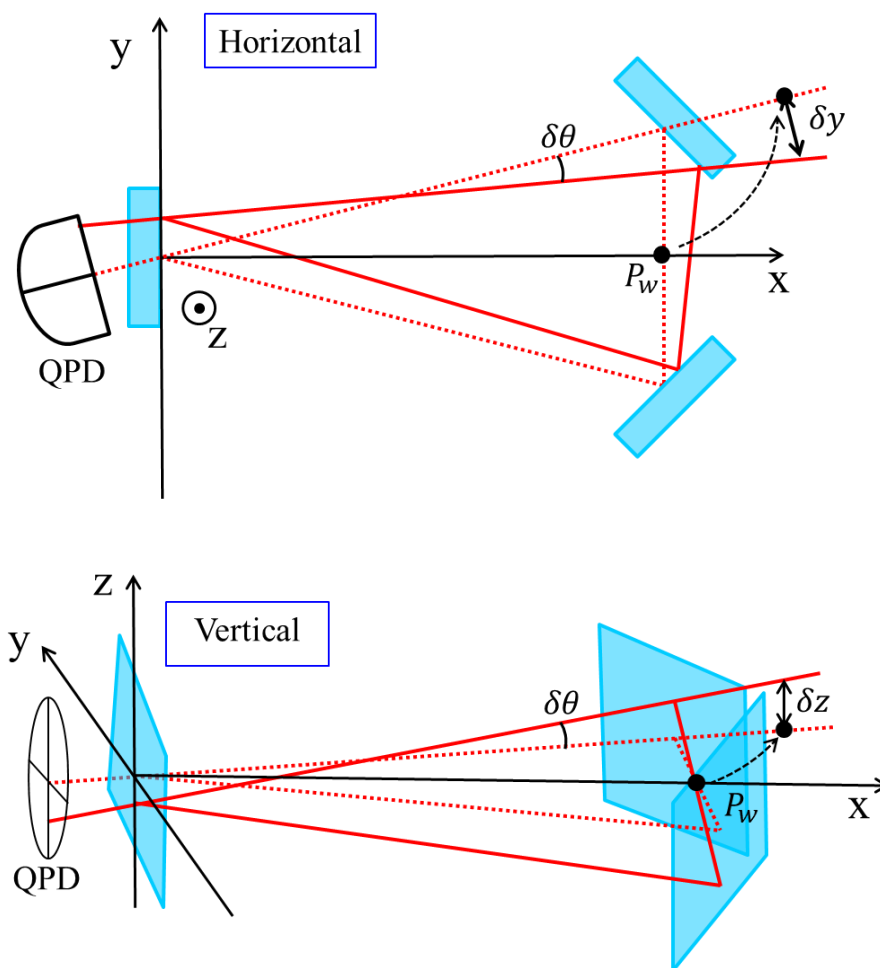


Fig.7.1 Ma-Mb 光軸上のウェスト位置の平行移動、回転

7-1 ミスアラインメント後の Ma、Mb のビームスポットの座標

ミスアラインメントによる光軸の変化は、Ma と Mb のビームスポットの座標を用いて求めることができる。初めに、Table.7.1 に、各ミラーに角度変化が生じたときの座標をまとめた。[2]

Table.7.1 : ミスアラインメント後のビームスポットの座標

Direction	Cause	x_a	y_a	x_b	y_b
Horizontal	α_b	$L + \frac{d R \alpha_b}{(R - L - d)}$	$d - \frac{d R \alpha_b}{(R - L - d)}$	0	$-\frac{L + d}{(R - L - d)} R \alpha_b$
	α_+	$L - \frac{d(R - L)}{(R - L - d)} \alpha_+$	$d + \frac{d(R - L)}{(R - L - d)} \alpha_+$	0	$\frac{dR}{(R - L - d)} \alpha_+$
	α_-	$L - \sqrt{L^2 + d^2} \alpha_-$	$d + \sqrt{L^2 + d^2} \alpha_-$	0	0

Direction	Cause	x_a	z_a	x_b	z_b
Vertical	β_b	L	$-\beta_b R$	0	$-\beta_b R$
	β_+	L	$\beta_+ \frac{(R - L)}{\sqrt{2}}$	0	$\beta_+ \frac{R}{\sqrt{2}}$
	β_-	L	$-d \frac{\beta_-}{\sqrt{2}}$	0	0

ウェスト周りの光軸の回転は、ミスアラインメント後の Ma と Mb のビームスポットの座標を結ぶ方程式の傾きから求められる。そこで、まず、Ma と Mb のビームスポットを結ぶ光軸の方程式を求める。

ミスアラインメント前の Ma と Mb のビームスポットを結ぶ光軸の方程式は、

$$\text{水平方向 : } y = \frac{d}{L} x \quad (7.3)$$

$$\text{垂直方向 : } z = 0 \quad (7.3)$$

である。

ミスアラインメント後は、Table7.2 のようになる。

Table.7.2 ミスアラインメント後の Ma-Mb 光軸の方程式

Direction	Cause	Equation
Horizontal	α_b	$y = \frac{d + L\theta_b}{L + d\theta_b}x - (L + b)\theta_b$
	α_+	$y = \frac{d - d\varphi_+}{L - d\theta_+}x + \frac{dR}{L}\varphi_+$
	α_-	$y = \frac{d + S\alpha_-}{L - S\alpha_-}x$

Direction	Cause	Equation
Vertical	β_b	$z = -\beta_b R$
	β_+	$z = -\frac{\beta_+}{\sqrt{2}}x + \frac{R\beta_+}{\sqrt{2}}$
	β_-	$z = -\frac{d\beta_-}{L\sqrt{2}}x$

ただし、

$$S = \sqrt{L^2 + d^2}$$

$$\theta_b = \frac{R}{R - L - d}\alpha_b$$

$$\theta_+ = \frac{R - L}{R - L - d}\alpha_+$$

$$\varphi_+ = \frac{L}{R - L - d}\alpha_+$$

である。

ミスアラインメント前の Ma と Mb のビームスポットの座標を結ぶ方程式の傾きを m_1 、ミスアラインメント後の傾きを m_2 とすると、ミスアラインメントによる光軸の回転 $\delta\theta$ は、

$$\delta\theta = \tan^{-1}\left(\frac{m_2 - m_1}{1 + m_1 m_2}\right) \quad (7.3)$$

で求められる。

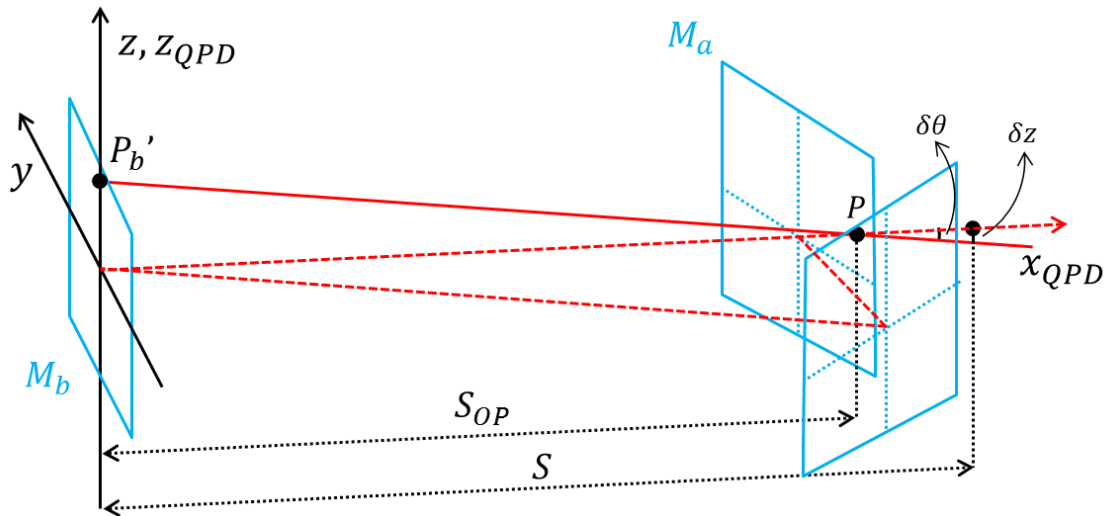


Fig.7.4 垂直方向の光軸の変化

ただし、 S は原点からミスアラインメント前のウェストまでの距離、

$$S = \sqrt{L^2 + d^2}$$

である。 S_{OP} は、ミスアラインメント前とミスアラインメント後の M_a - M_b 光軸の方程式の交点 P と原点 O の距離である。

Table7.4 に交点 P を求める。

Table.7.4 ミスアラインメント前とミスアラインメント後の M_a - M_b 光軸の方程式の交点 P

Direction	Cause	Coordinate $P(x,y)$
Horizontal	α_b	$\left(\frac{L(L + d\theta_b)}{L - d}, \frac{d(L + d\theta_b)}{L - d} \right)$
	α_+	$\left(\frac{R(L - d\theta_+)\varphi_+}{L\varphi_+ - d\theta_+}, \frac{dR(L - d\theta_+)\varphi_+}{L(L\varphi_+ - d\theta_+)} \right)$
	α_-	$(0, 0)$

Direction	Cause	Coordinate $P(x, z)$
Vertical	β_b	Do not intersect
	β_+	$(R, 0)$
	β_-	$(0, 0)$

Table7.5 に、交点 P と原点 O の距離 S_{OP} を示す。

Table7.5 交点 P と原点 O の距離 S_{OP}

Direction	Cause	Distance S_{OP}
Horizontal	α_b	$\frac{L + d\theta_b}{L - d} S$
	α_+	$\frac{R(L - d\theta_+)\varphi_+}{L(L\varphi_+ - d\theta_+)} S$
	α_-	0

Direction	Cause	Distance S_{OP}
Vertical	β_b	∞ (Do not intersect)
	β_+	R
	β_-	0

Fig.7-3, Fig.7-4 から、Ma-Mb 光軸上のウェストの位置での平行移動 $\delta y, \delta z$ は、

$$\delta y = \delta z = (S - S_{OP})\delta\theta \quad (7.4)$$

となる。

ただし、同相角度変化 β_b についてのみ、

$$\delta z = z_b \quad (7.5)$$

である。

式(7.4)から、各ミラーの角度変化による Ma-Mb 光軸上のウェストの位置での平行移動 δy を求め、Table7.6 にまとめた。

Table7.6 ミスアラインメントによる Ma-Mb 光軸の平行移動

Direction	Cause	Displacement error δy
Horizontal	α_b	$S \left(1 - \frac{L + d\theta_b}{L - d} \right) \delta\theta$
	α_+	$S \left(1 - \frac{R(L - d\theta_+) \varphi_+}{(L\varphi_+ - d\theta_+)L} \right) \delta\theta$
	α_-	$S\delta\theta$

Direction	Cause	Displacement error δz
Vertical	β_b	$-\beta_b R (= z_b)$
	β_+	$(S - R)\delta\theta$
	β_-	$S\delta\theta$

Table7.7 に、ミスアラインメントによる Ma-Mb 光軸上のウェスト位置の平行移動、回転をまとめた。

Table7.7 : ミスアラインメントによる Ma-Mb 光軸上のウェスト位置の平行移動、回転

Direction	Cause	δy	$\delta\theta$
Horizontal	α_b	$S\left(1 - \frac{L + d\theta_b}{L - d}\right)\delta\theta$	$\tan^{-1}\left(\frac{(L^2 - d^2)\theta_b}{S^2 + 2Ld\theta_b}\right)$
	α_+	$S\left(1 - \frac{R(L - d\theta_+)\varphi_+}{(L\varphi_+ - d\theta_+)L}\right)\delta\theta$	$\tan^{-1}\left(\frac{d(d\theta_+ - L\varphi_+)}{S^2 - Ld\theta_+ - d^2\varphi_+}\right)$
	α_-	$S\delta\theta$	$\tan^{-1}\left(\frac{(d + L)\alpha_-}{S + (d - L)}\right)$

Direction	Cause	δz	$\delta\theta$
Vertical	β_b	$-\beta_b R$	0
	β_+	$(S - R)\delta\theta$	$\tan^{-1}\left(\frac{-\beta_+}{\sqrt{2}}\right)$
	β_-	$S\delta\theta$	$\tan^{-1}\left(-\frac{d\beta_-}{L\sqrt{2}}\right)$

ただし、

$$S = \sqrt{L^2 + d^2}$$

$$\theta_b = \frac{R\alpha_b}{R - L - d}$$

$$\theta_+ = \frac{R - L}{R - L - d}\alpha_+$$

$$\varphi_+ = \frac{L}{R - L - d}\alpha_+$$

である。

7-4 TRANS で得られる WFS 信号強度の Gouy 位相依存性

Table.7.7、式(6.6)を用いて、TRANS で得られる信号の Gouy 位相依存性を水平方向については Fig.7.5 に、垂直方向については、Fig.7.6 に示した。計算に使用したパラメータは Table.5.1 の値を用いた。

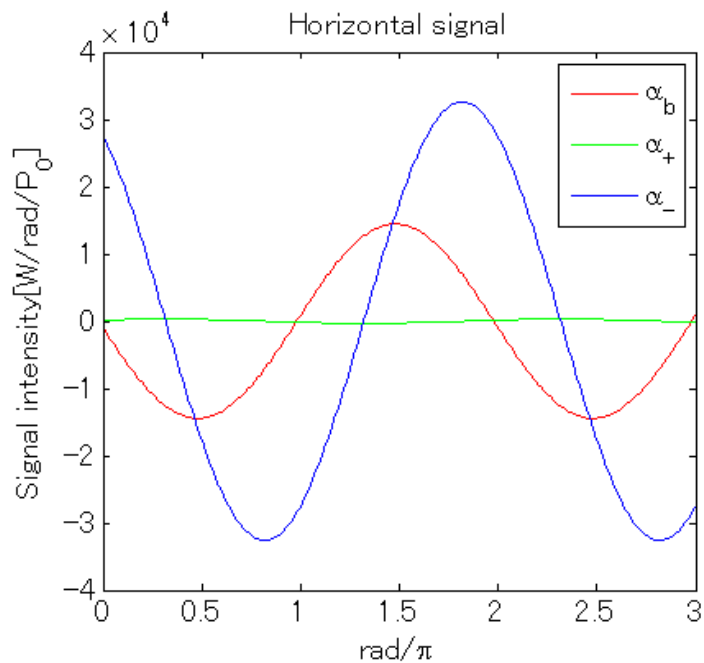


Fig.7.7 水平方向の信号強度の Gouy 位相依存性

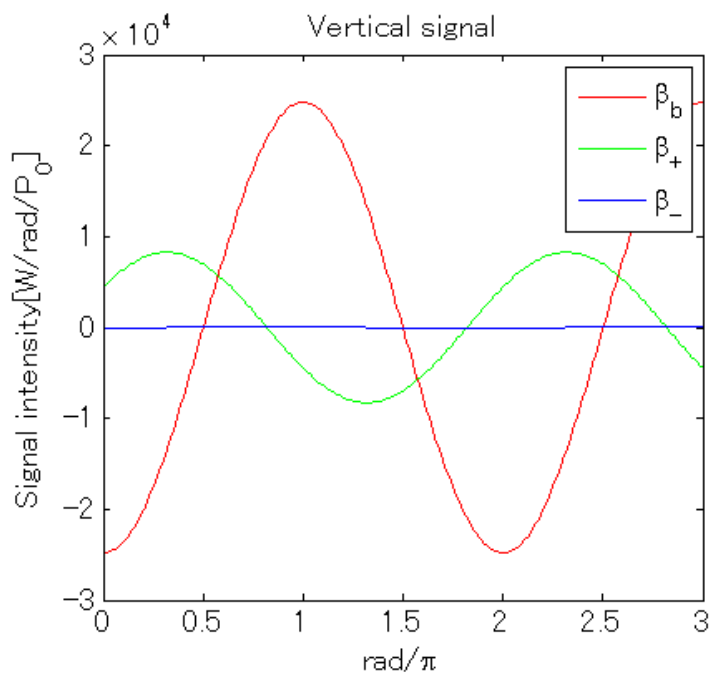


Fig.7.8 垂直方向の信号強度の Gouy 位相依存性

8 Sensing Matrix

QPD には、それぞれのミスアラインメントによる信号が混ざって現れる。これでは、どの角度変化に対して、フィードバックを行えばよいのか分からない。そこで、それぞれのミスアラインメントによる信号を分離する必要がある。信号の分離は、QPD を信号の分離しやすい Gouy 位相を選んで配置することによって行う。Table.8.1 に信号を分離しやすい Gouy 位相を選んで、その位置での信号強度を示した Sensing Matrix を示す。

Table.8.1 Sensing Matrix

QPD Name(η)	α_b	α_+	α_-	β_b	β_+	β_-	unit
REFL(0deg)	-39418	-11519	0	0	7958	-7958	W/rad/ $P_0 J_0(\beta) J_1(\beta)$
REFL(90deg)	0	0	17637	24918	0	0	W/rad/ $P_0 J_0(\beta) J_1(\beta)$
TRANS (57deg)	-12644	315	0	-13431	8266	0	W/rad/ P_0
TRANS (90deg)	-14420	267	-17656	0	6960	76	W/rad/ P_0

参考文献

[1]道村唯太: Wavefront Sensor の原理 (2011)

[2] F. kawazoe et al: Eigenmode changes in a misaligned triangular optical cavity ,J.Opt.13(2011)