

SPring-8 挿入光源ビームラインにおける四象限型 XBPM を用いた光軸測定 PHOTON BEAM AXIS MEASUREMENT USING A FOUR-BLADE-DRIVE XBPM AT THE SPring-8 INSERTION DEVICE BEAMLINE

青柳 秀樹[#]

Hideki Aoyagi[#]

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

By placing two X-ray beam position monitors (XBPMs) upstream and downstream of the same single beamline, both the position and angle of the photon beam can be determined with high precision. At SPring-8 BL15XU, a four-blade-drive XBPM featuring variable sensor spacing was installed upstream to eliminate interference from the upstream detector's shadow on the downstream XBPM. However, widening the sensor spacing introduced significant X-Y coupling errors. To correct this, we devised a calibration method that represents the position-sensitivity coefficients as a 2×2 linear-transformation matrix, effectively removing X-Y coupling. On-site validation confirmed a level of correction accuracy unattainable with conventional techniques.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 では、各放射光ビームラインのフロントエンドに光電子放出型放射光(X線)位置モニター(X-ray Beam Position Monitor, XBPM)を1台ずつ設置し、光源からの放射光ビームの変動を角度として測定している[1]。従来の単一 XBPM でも実用上十分な精度を示してきたが、同一ビームラインに2台目を併用することで、位置および角度測定の精度向上が期待できる。

BL15XU では、フロントエンド上流部(光源から約20 m)に検出素子間隔を独立に可変とする四象限型 XBPM、下流部(約25 m)には従来型の固定ブレード式 XBPM をそれぞれ導入し、上流 XBPM の検出素子が放射光ビームを遮蔽しないように設計した。しかし、四象限型 XBPM の検出素子間隔を広げた結果、水平・垂直方向の位置感度係数に顕著なカップリング(以下 X-Y カップリング)が発生し、2台同時運用に制約が生じた。

電極間の相対利得偏差を補正するビームベース利得校正法[2, 3]は既に報告されているが、本研究では、位置感度係数を 2×2 行列による線形変換で表現し、X-Y カップリングを効率的に除去する簡便な校正手法を考案した。本報告では、四象限型 XBPM の X-Y カップリングの定量評価、提案する校正手法の手順、および電子ビーム軌道を意図的に変化させた実験による XBPM 応答特性の検証結果について議論する。

2. 四象限型 XBPM の X-Y カップリング

BL15XU は、フロントエンド上流(光源より20.3 m)と下流(25.2 m)に四象限型 XBPM と固定ブレード型 XBPM をそれぞれ配置した(Fig. 1)。上流 XBPM 1(Fig. 2 (a), (b))は4枚のブレード検出素子を独立駆動できるため、下流 XBPM 2(Fig. 2 (c))への干渉を回避可能である。下流 XBPM 2 は、SPring-8 挿入光源ビームラインに標準型として採用されているもので、ブレード型検出素子先端の位置は中心から水平方向 ± 3.0 mm、垂直方向

± 2.0 mm である。以上の配置条件から、上流 XBPM_1 のブレード先端は図面上でビーム中心から最低 3.8 mm 以上離す必要があることと判断した。実運用では安全マージンを考慮し、ブレード間隔を 4.6 mm に設定した。

四象限型 XBPM を単独運用する際は、ブレード間隔を狭くできるため、放射光プロファイル中心への近接が可能となる。検出素子の耐熱性を考慮して、ブレード検出素子先端の位置を 2.8 mm とすることが最適と判断した。この場合、検出電流信号の絶対値も大きくなるため分解能向上が期待できる。また、挿入光源 Gap 依存性が低減し、X-Y カップリングも無視できる程度であった。四象限型 XBPM のブレード位置に対する4つ検出素子からの電流信号の平均値を Fig. 3 に示す。この図からわかるように、2台の同時運用のためにブレード検出素子

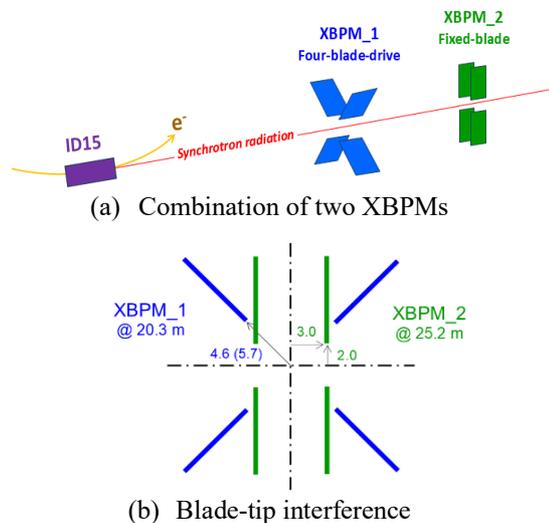


Figure 1: (a) XBPM_1 must be arranged so that its blade-shaped detector elements do not affect XBPM_2. (b) The blade-tip of XBPM_1 lies 4.6 mm from the center, which corresponds to 5.7 mm when projected onto the XBPM_2 position.

[#] aoyagi@spring8.or.jp

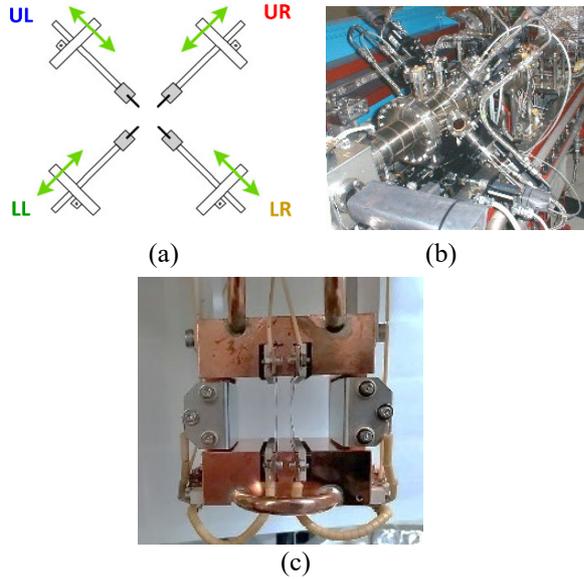


Figure 2: (a) Schematic of XBPM_1, (b) Photo of the main unit of XBPM_1, (c) Photo of the detector section of XBPM_2.

先端の位置を 4.6 mm 以上とすると、検出電流信号の絶対値が小さくなり、分解能を低減させる可能性が生じることが分かっている。

四象限型 XBPM の出力値 (4 信号の差/和) における X-Y カップリングの度合いについて評価するため、4 枚のブレード検出素子先端の位置を変化させて X-Y 平面上を走査し、各位置で得られた 4 信号の“和分の差”をプロットした (Fig. 4)。理想的にはプロットされた格子点は正方形の頂点上に並ぶが、実測では格子点に歪みが認められた。これは、本来水平方向 (垂直方向) にのみビームが変位した場合でも、XBPM の出力が垂直方向 (水平方向) の変位を誤って含んで表示していることを意味する。この格子点の歪みは、ブレード検出素子先端が中心よりも離れるほど顕著になる傾向も確認された。

3. X-Y カップリングを除去する補正係数

この歪の問題を実効的に解消する手段として、位置の換算係数 (補正係数) を 2×2 行列で表現し、実測した和

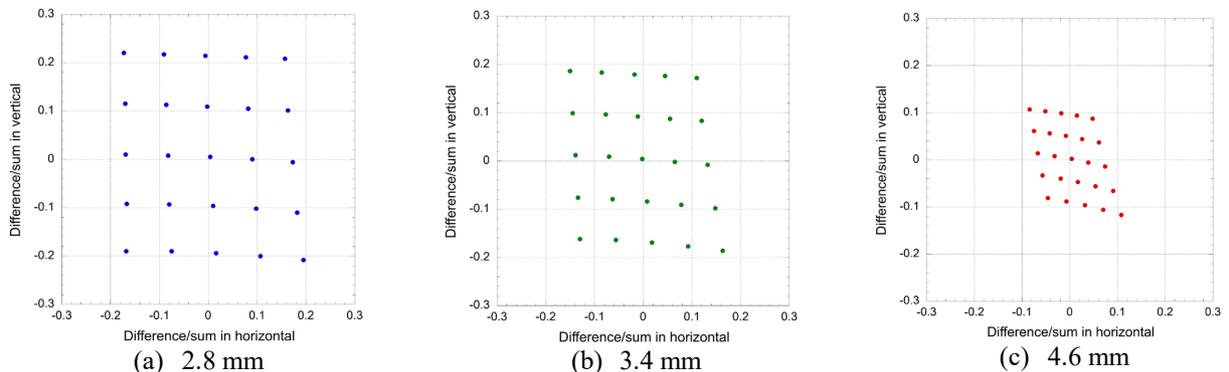


Figure 4: X-Y plane scan measurement obtained by varying the positions of the tips of the four detector elements. The tip positions relative to the center are (a) 2.8 mm, (b) 3.4 mm, and (c) 4.6 mm, corresponding to the red arrows in Fig. 3.

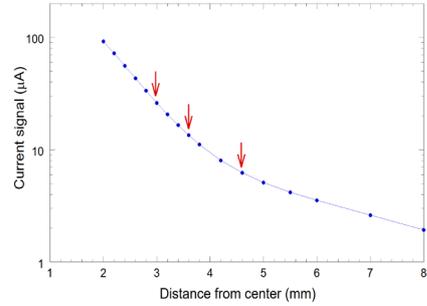


Figure 3: Current signal when the blade position of the four-blade-drive XBPM (XBPM_1) is changed. The vertical axis shows the average current signal from the four detector elements. The red arrows indicate the measurement points in Fig. 4.

分の差の値を線形写像により変換することとした。2×2 行列の 4 つの成分を求めるためには、測定点の数は数学的には 3 点で十分であるが、Fig. 5 の緑色の点で示す 4 点 (a-d 点) とし、成分を以下のように定義する。

a 点: (x_a, y_a) 、b 点: (x_b, y_b) 、c 点: (x_c, y_c) 、d 点: (x_d, y_d)

また、水平方向、および、垂直方向の和分の差は下記の通り表すことができる。

$$\text{水平方向} : x = \frac{(UR+LR)-(UL+LL)}{UL+UR+LL+LR}$$

$$\text{垂直方向} : y = \frac{(UL+UR)-(LL+LR)}{UL+UR+LL+LR}$$

3.1 従来の補正係数の計算

従来の補正係数を 2×2 行列で表記すると式(1)となる。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Ax & 0 \\ 0 & Ay \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (1)$$

したがって、

$$Ax = \frac{2 \Delta x}{(x_b - x_a)} \quad Ay = \frac{2 \Delta y}{(y_d - y_c)}$$

ここで、 Δx , Δy は実際のビームの原点からの変位量を示す。

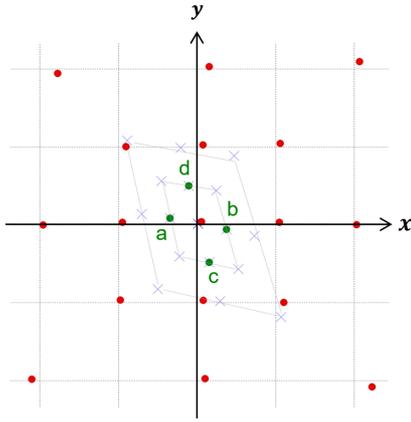


Figure 5: Mapping for coupling compensation. The green dots indicate the four measurement points. By using the correction coefficients of the 2×2 matrix, the measurement points (blue ×) that were distorted by X-Y coupling are converted to the vertices of the square (red dots).

3.2 X-Y カップリングを補正する補正係数の計算

X-Y カップリングを補正することのできる補正係数 A は式(2) のように 2×2 行列で表記することができる。

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{1 - \alpha\beta} \begin{pmatrix} 1 & \alpha \\ \beta & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Ax & 0 \\ 0 & Ay \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、以下のように α と β を導入した。

$$\alpha = -Ax \times (x_d - x_c) / 2\Delta x,$$

$$\beta = -Ay \times (y_b - y_a) / 2\Delta y$$

この方法によって得られた補正係数 A を Table 1 に示す。

Table 1: Summary of Correction Coefficients

Correction coefficient	XBPM_1	XBPM_2
A (to create Fig. 6, 8)	$\begin{pmatrix} 2.96 & 0.77 \\ 0.44 & 2.15 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.21 & -0.01 \\ 0.00 & 0.76 \end{pmatrix}$
A' (correction factor for A)	$\begin{pmatrix} 0.94 & -0.06 \\ -0.03 & 1.12 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 5.79 & -0.25 \\ -0.41 & 1.83 \end{pmatrix}$
$A'' = A' \times A$ (to create Fig. 9)	$\begin{pmatrix} 2.81 & 0.86 \\ 0.57 & 2.60 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.23 & -0.12 \\ -0.09 & 1.38 \end{pmatrix}$

3.3 2×2 行列の補正係数 A の検証

前項に示した 2×2 行列の補正係数が正しく機能していることを検証するために、上流 XBPM_1 において X-Y 平面上を広く走査して測定を実施した (Fig. 6)。補正係数 A で演算した XBPM の出力値 (赤点) は、正方形の頂点に格子状に並んでいることが分かる。僅かであるが赤い点が弓状となっているのは、線形写像を採用しているため曲線の成分が除去しきれていないためである。しかし、実用上問題ない程度であると考えている。この手法を用いることの利点は、従来の補正係数の算出と同じ数の測定点を用いるのみで、かつ、簡素な算術によって実用上十分な精度で X-Y カップリングの除去が可能とい

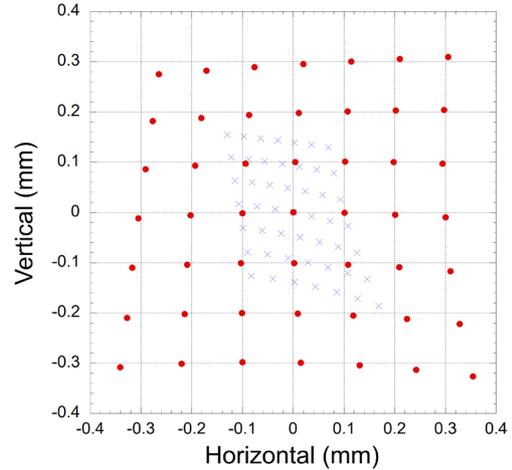


Figure 6: Scan measurement of XBPM_1 using correction coefficient A . The blue “x” indicates the diff/sum values prior to coordinate transformation.

うことである。

4. 角度を振って XBPM の応答を観察

電子ビーム軌道の角度に作用する局所的なバンプを形成することで実際に光軸を変位させて、2 台の XBPM で観測して、変位を正しく確定できるかどうかを検証した。Figure 7 に示すように、振り幅のステップは水平・垂直方向いづれも 2.5 μrad となるように測定点を選んだ。

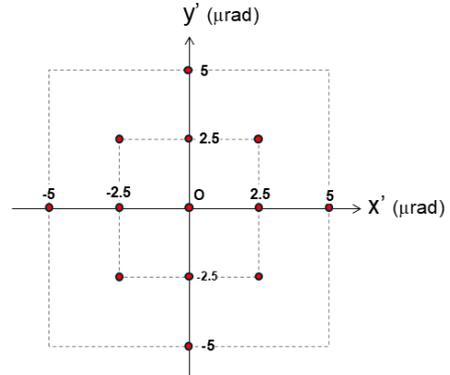


Figure 7: Variation in measurement points set by local bumps.

4.1 ステージ移動による補正係数 A と応答

角度に作用するローカルバンプを生成した時の XBPM_1, 2 のそれぞれの応答を Fig. 8 に示す。XBPM_1 では、垂直方向の値が小さくなっているものの、概ね想定通りの応答が見られた。一方、XBPM_2 では、特に水平方向で応答が小さく観測され、X-Y のカップリングも認められる。この原因は、XBPM_1 と XBPM_2 の間に設置されている主マスクの開口により放射光のプロファイルが制限されているためである。

4.2 補正係数 A の補正

前項で示したように、XBPM_2 において応答が小さく観測されたことから、補正係数を更に補正することを試

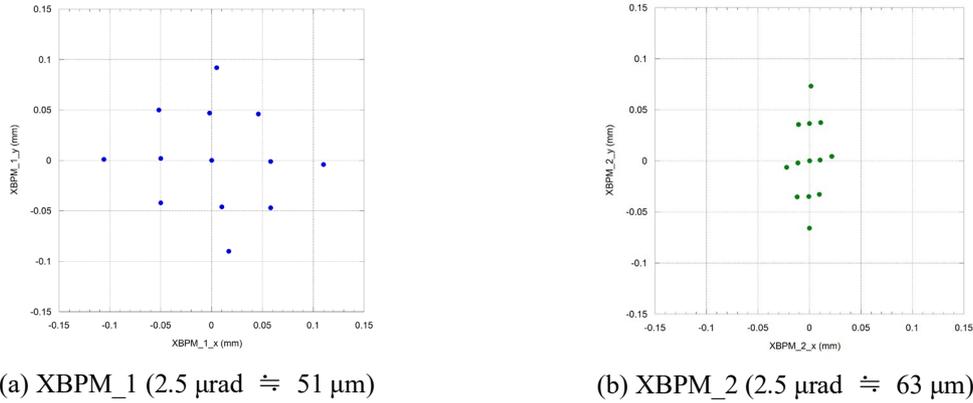


Figure 8: XBPM response using correction coefficient A when a local bump (angle) is generated.

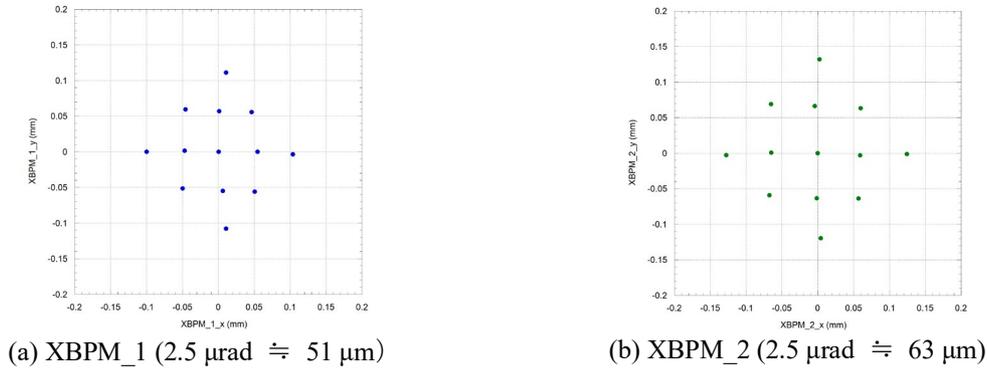


Figure 9: XBPM response using correction coefficient A' when a local bump (angle) is generated.

みた。Figure 7 における上・下・左・右にそれぞれ $5 \mu\text{rad}$ 振った下記の4点を用いて、改めて、X-Yカップリング除去が可能な 2×2 行列の補正量(係数)を算出した。

$$(\Delta x', \Delta y') = (\pm 5 \mu\text{rad}, 0), (0, \pm 5 \mu\text{rad})$$

この測定で得られた補正係数 A' を基の補正係数 A に対して左から掛けることによって補正係数 $A'' = A' \cdot A$ を求めることができる(Table 1)。補正された補正係数 A'' を用いてプロットした結果を Fig. 9 に示す。XBPM_1 での一次の X-Y カップリングは除去されていることが分かる(Fig. 9 (a))。また、XBPM_2 における放射光プロファイルの制限による影響は回復され、X-Y カップリングの除去も達成している(Fig. 9 (b))。

5. まとめ

SPring-8 BL15XU において、放射光ビームの位置・角度精度向上を目的に、光源から約 20.3 m 上流に四象限型 XBPM、約 25.2 m 下流に固定ブレード型 XBPM を併設した。四象限型 XBPM では検出素子間隔を広げた結果、X-Y カップリングが顕在化したため、 2×2 行列で表す補正係数を導入し、実測値を線形変換して補正を試みた。その結果、プロット図がほぼ正方格子に復元されることを確認した。さらに、電子ビーム軌道に局所的なバンブを与えて光軸を変位させる実験を行い、本手法の有効性を検証した。四象限型 XBPM では想定どおりの応答を得られた。一方で、固定ブレード型 XBPM では遮光マスクによるプロファイル制限の影響で応答低下と X-Y

カップリングの増大が観測されたが、補正係数を再調整することで問題を解消できることを確認した。今後は長期安定性評価と演算処理の迅速化を進める予定である。

謝辞

実験を円滑に進めるにあたり、SPring-8 加速器運転員の皆様には多大なるご協力を賜りました。ビームライン制御およびデータ収集システム BL-774 の 2×2 行列補正係数の導入をいち早くご支援いただいた理化学研究所放射光科学研究センター 本村幸治氏および関係者の皆様にお礼申し上げます。補正係数算出公式のクロスチェックをしていただいた高輝度光科学研究センタービームライン光学技術推進室 松崎泰久氏および技術的なサポートをしていただいた同室のスタッフの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Aoyagi *et al.*, “Blade-type X-ray beam position monitors for SPring-8 undulator beamlines”, Nucl. Instr. and Meth. A 467-468, 252-255 (2001).
- [2] M. MASAKI *et al.*, “A Method of Beam-based Calibration for Beam Position Monitor”, in Proc. 11th Symposium on Accelerator Science and Technology, Harima Science Garden City, 1997, pp. 83-85.
- [3] H. Kuboki *et al.*, “Results of Beam Based Gain Calibration for Beam Position Monitor at J-PARC Main Ring”, in Proc. of PASJ2014, SAP075.