

16 電極ビームモニターを用いたビームプロファイル測定のための 最適化アルゴリズムの開発

DEVELOPMENT OF AN OPTIMIZATION ALGORITHM FOR BEAM PROFILE MEASUREMENT USING MULTIPLE 16-ELECTRODE BPMS

李耀漢^{*A)}、外山毅^{B)}、中村剛^{B)}、中家剛^{A)}、木河達也^{A)}、小関忠^{B)}、T2K コラボレーション
Yohan Lee^{*A)}、Takeshi Toyama^{A)}、Takeshi Nakamura^{A)}、Tsuyoshi Nakaya^{A)}、Tatsuya Kikawa^{A)}、Tadashi Koseki^{A)}、
T2K Collaborators
^{A)}Kyoto University, ^{B)}KEK/J-PARC

Abstract

In the T2K experiment, we are searching for the CP violation by a precise measurement of neutrino oscillations, and aiming to improve the measurement accuracy. In order to improve the accuracy, it is necessary to increase the output power of the neutrino beamline, and therefore the beam power of J-PARC's Main Ring (MR) is being upgraded. The upgraded beam power increases beam intensity-dependent instability, which leads to beam loss and makes stable beamline operation difficult. Further understandings of beam dynamics are required for a stable acceleration of the high-intensity beams. A new beam monitor called a 16-electrode beam monitor (16 Pick-Up Monitor, 16 PU monitor) has been developed to non-destructively measure the profile of high-intensity beams, which is important information for further understanding. Currently, the 16PU monitors are installed in two locations on the MR. In the previous research, the transverse RMS emittance of the beam was measured from the high-order moment component of the beam using the two 16PU monitors. Currently, the theme is a beam profile measurement, and we are investigating and simulating how precisely beam profile can be measured using multiple measurement points. In this talk, We will report the search results of an optimization algorithm that estimates the lateral shape of the beam from the 16 PU monitor data.

1. はじめに

J-PARC MR のビームは T2K のニュートリノ振動実験 (以下、T2K 実験) のために用いられている [1]。これまで T2K 実験では世界最高の精度で実験を行ってきたが、CP 対称性の破れを発見するには測定精度が不十分である。この測定精度を向上させるには、統計量を増量する必要があるが、そのため加速器側のアップグレードが進められている。

ビーム強度を増強するとき、ビームの強度に依存する不安定性によるビームロスの増大の低減は最も重要な課題である。ビームロスが加速器の許容範囲を超えると加速器の安定的な運転が出来なくなる。ビームロスの低減の手段の一つとして、ビームの入射時に起こる Twiss パラメータのミスマッチ (入射ミスマッチ) によるビームサイズ振動を抑制することが挙げられる。そのためには、ビームサイズを正確に測定する必要があり、本研究ではビームサイズの振動成分情報を用いて入射ミスマッチを調整することでビームの振動を抑えることを考えている。

しかし、これまで測定を行っていたビームサイズモニターが大強度ビームの環境化では測定が困難になる状況があることや既存のビームサイズモニターを含めるとしてもモニターの数が必要な問題があった。よって、大強度ビームの測定が可能な新しいビームサイズモニターを開発することになり、これが本研究の対象である 16 電極ビームモニターである。16 電極ビームモニターは MR の入射部付近で

起こるビームサイズ振動の測定を目指しており、現在 MR の 2 か所に設置され、実運用に向けて研究が進んでいる。

現在 16 電極ビームモニターを用いた非破壊測定から得られたデータを使ってビームサイズを推定するアルゴリズムの開発を行っている。アルゴリズムの最終目標は、入射ミスマッチ状態のビームプロファイルを精度よく推定することであり、現段階でデータからビームプロファイルを推定する基礎的な機能が実装されたアルゴリズムがプロトタイプが完成している。本稿では、そのプロトタイプのアルゴリズムの説明と動作検証、また、今後の開発の方向性について述べる。

2. 16 電極ビームモニター

2.1 モニターの基本情報

16 電極ビームモニターはストリップライン型ビームモニターであり、前述の通りビームサイズの測定を目的としている。2016 年に MR の #13 に 1 台目のモニターが設置され、キャリブレーションが行われた [2]。2017 年には 16 電極ビームモニターのための読み出し回路が開発された [3]。その後、2019 年に MR の #15 に 2 台目のモニターが設置され、2 台のモニターを使ってエミッタンスの測定を行った [4]。Figure 1 は 16 電極ビームモニターの概略図である。また、Table 1 に 16 電極ビームモニターの寸法の設計値を示した。

* lee.yohan.83w@st.kyoto-u.ac.jp

Table 1: 16 電極ビームモニターの寸法

項目	数値	項目	数値
全体の長さ	500 mm	電極の長さ	320 mm
外径	195 mm	電極の厚み	5.0 mm
内径	165 mm	電極の幅	9.85 mm

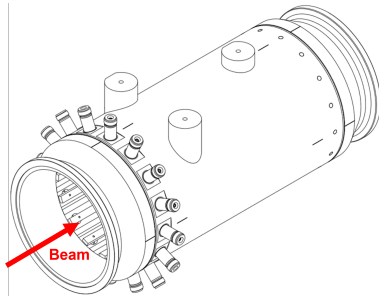


Figure 1: 16 電極ビームモニターの概略図 [5]

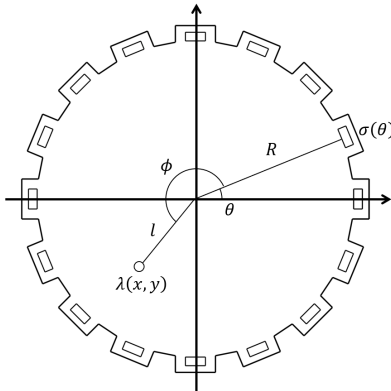


Figure 2: 16 電極ビームモニターの断面図

2.2 測定原理

この節では 16 電極ビームモニターの測定原理について簡単に述べる。モニターの断面を Fig. 2 のように考え、そこに線電荷密度 λ の単粒子のビームが $\lambda = \lambda(x, y) = \lambda(l, \phi)$ (x, y は直交座標系における座標、 l, ϕ は極座標系における座標) を通るとする。このとき、モニターの表面に誘導される電荷 $\sigma(\theta, R)$ は Maxwell 方程式から以下のように導かれる。

$$\sigma(\theta, R) = \frac{\lambda}{2\pi R} \frac{R^2 - l^2}{R^2 + l^2 - 2Rl \cos(\phi - \theta)} \quad (1)$$

ここで、 R はビームモニターの内径である。Equation (1) は以下のように展開される。

$$\sigma(\theta, R) = \frac{\lambda}{2\pi R} \left[1 + 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\mathcal{O}_n(\theta)}{R^n} \right] \quad (2)$$

$$\mathcal{O}_n(\theta) = \cos(n\theta) \text{Re}(x + iy)^n + \sin(n\theta) \text{Im}(x + iy)^n$$

ビームによりモニターの表面 (θ, R) に生じる信号の強度 V は鏡像電荷 $\sigma(\theta, R)$ に比例する ($V \propto \sigma$)。

モニターの表面の 16 か所でビームの信号を測定するので、Eq. (2) により 16 個の連立方程式が立てられる。この連立方程式を行列表現に書き直すと、以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_{15} \end{pmatrix} = A \times \begin{pmatrix} 1 \\ \langle x \rangle \\ \langle y \rangle \\ \langle x^2 - y^2 \rangle \\ \langle 2xy \rangle \\ \vdots \\ \langle \text{Re}(x + iy)^8 \rangle \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$A = \frac{Q}{2\pi R} \begin{pmatrix} 1 & \frac{\cos \theta_0}{R} & \frac{\sin \theta_0}{R} & \dots & \frac{\cos 8\theta_0}{R^8} \\ 1 & \frac{\cos \theta_1}{R} & \frac{\sin \theta_1}{R} & \dots & \frac{\cos 8\theta_1}{R^8} \\ 1 & \frac{\cos \theta_2}{R} & \frac{\sin \theta_2}{R} & \dots & \frac{\cos 8\theta_2}{R^8} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \frac{\cos \theta_{15}}{R} & \frac{\sin \theta_{15}}{R} & \dots & \frac{\cos 8\theta_{15}}{R^8} \end{pmatrix}$$

ここで、 $\theta_i = i\pi/8$ ($i = 0, 1, 2, \dots, 15$) である。また、ビームが複数の粒子のパンチとなっているため、電荷密度 $\rho(x, y)$ を使って、 $Q = \int dx dy \rho(x, y)$ 、 $\langle F(x, y) \rangle = \int dx dy \rho(x, y) F(x, y) / Q$ の変換を行った。Equation (3) に逆行列 A^{-1} をかけることで、ビームの多重極モーメントが得られる。ビームの多重極モーメントの Octupole モーメントまでを Table 2 に示す。これらのモーメントにはビームの分布の形状の情報が込められているため¹、今回開発したビームサイズ推定によって重要な情報である。

Table 2: ビームの多重極モーメント

Moment	Normal 成分	Skew 成分
Dipole	$\langle x \rangle$	$\langle y \rangle$
Quadrupole	$\langle x^2 - y^2 \rangle$	$\langle 2xy \rangle$
Sextupole	$\langle x^3 - 3xy^2 \rangle$	$\langle 3x^2y - y^3 \rangle$
Octupole	$\langle x^4 - 6x^2y^2 + y^4 \rangle$	$\langle 4x^3y - 4xy^3 \rangle$
\vdots	\vdots	\vdots

3. 解析アルゴリズムの開発

16 電極ビームモニターの測定により算出される多重極モーメントはビーム分布の射影された 1 次元のデータである。しかし、推定しようとするビームの分布は 2 次元であり、一般的な方法では 16 電極ビームモニターの測定からビームの分布を再構成するのはとても困難である。そこで、このような性質の問題によく使われる遺伝的アルゴリズムを参考にし解析アルゴリズムを開発することになった。開発したアルゴリズムのフローチャートを Fig. 3 に示す。以

¹ 例えば、Dipole Moment にはビームの重心位置の情報が、Quadrupole Moment にはビームサイズの情報が込められている。

下に各プロセスについて説明する。より詳しい説明は参考文献 [6] に示してある。

個体生成:

遺伝的アルゴリズムは複数のランダムな候補を生成し、これらの候補の中から最適化を探索する最適化アルゴリズムである。この候補を個体 (individual) と呼ぶ。生成される個体は全て 2 次元ガウシアン分布に従い、10000 個のマクロ粒子に成るビームの分布である。

適合度評価:

生成された各個体は入力された測定値との違いから適合度 (Fitness) を評価される。適合度は 2 次元平面のメッシュ上に粒子により作られる電荷密度分布を基準に計算される。個体内の適合度 F は各個体により算出される 16 個の多重極モーメント $M_{ind,i}$ ($i = 0, 1, 2, \dots, 15$) と測定によって算出される 16 個の多重極モーメント $M_{meas,i}$ ($i = 0, 1, 2, \dots, 15$) 間の差の 2 乗の総和で算出し、高次のモーメントの高次項を考慮した重み ω_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 15$) をかける。適合度 F が小さい個体が品質の良い個体と見なす。

$$F = \sum_{i=0}^{15} \omega_i (M_{meas,i} - M_{ind,i})^2 \quad (4)$$

バンチ形状探索:

最初に生成されるビームのガウシアン分布になっているが、実際の加速器では非ガウシアン分布に従う形状のビームも存在し、開発中のアルゴリズムはこれら一般的なビーム形状の再構成を目標としている。よって、アルゴリズムの中で各個体に平行移動・拡大、縮小・回転・屈曲のランダムな変形を起こしながら、より品質が良い個体を探索する。これらの変形は S.Haciomeroglu らのシミュレーションを参考にした [7]。

選択:

各個体は適合度を基準に選択される。選択された個体は次世代に伝搬する親個体となり、子個体を生産する。

交叉:

交叉では、親個体同士のマクロ粒子を交換する。遺伝的アルゴリズムは選択されたそれぞれの個体の中に「良い情報」が潜んでいる暗黙の前提を持つ。したがって、個体間のマクロ粒子の交換により、やがて品質の良い個体になっていく。

突然変異:

遺伝的アルゴリズムを含む最適化アルゴリズムは局所的最適解の問題が存在する。個体を適合度に沿って素直に伝搬させると、局所的最適解に陥った状態から脱出することができない。よって、ビーム形状を適合度とは関係なくランダムに変形させることで、局所的最適解から脱出し大域的最適解を探索し続けることを可能とする。

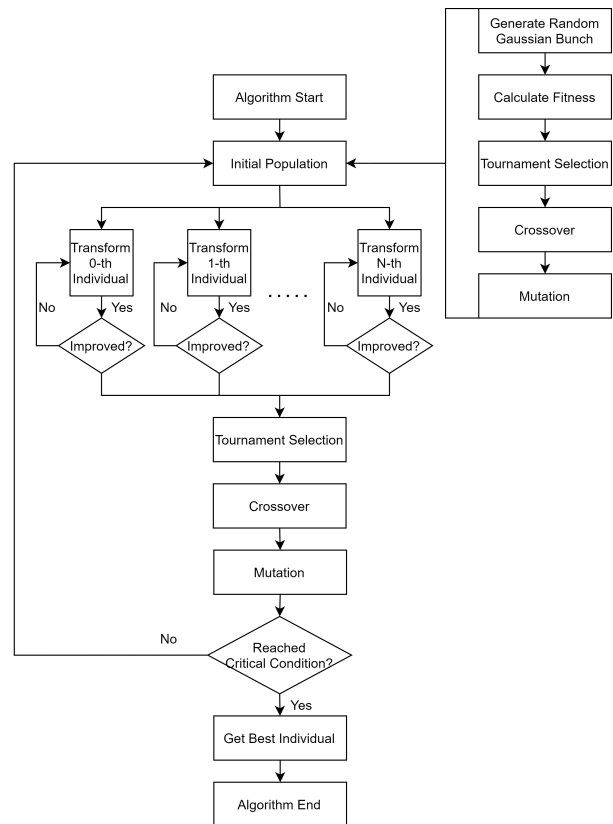


Figure 3: アルゴリズムのフローチャート

4. 解析結果

新しく開発したアルゴリズムを用いて実測定により得られたデータからビームサイズを算出し、従来の測定方法との比較を行った。ここで、従来の方法というのは、MR に設置された 2 台の 16 電極ビームモニターで得られたデータからビームの多重極モーメントをそれぞれ算出し、そこからエミッタンスを算出した後、エミッタンスとベータ関数の掛け算によりビームサイズを逆算する方法を意味する [4]。新しいアルゴリズムはモニター 1 台のみを用いてビームサイズの算出する特徴がある。従来の方法による解析にもまだ解決すべき課題は存在するが、他のモニターとの比較から算出したビームパラメータの傾向は一致していることが確認できたため、比較する意味があると判断した。本稿では #13 に設置された 16 電極ビームモニターからの 500 ターン周回するビームを測定したデータを用いた解析を比較する。

Figure 4 及び Figure 5 はそれぞれ従来の方法により算出したターン毎のビームサイズと新しいアルゴリズムにより算出したターン毎のビームサイズを表している。青線は水平方向のビームサイズ、橙線は水平方向のビームサイズを表す。Figure 4 を見ると、水平・垂直方向のビームサイズの変動が小さく、概ね一定にビームサイズが維持されていることが確認できる。その反面、Fig. 5 の場合は水平・垂直方向のビームサイズの変動が激しく、そのばらつきが大きい。

しかし、平均は概ね Fig. 4 と一致している。Table 3 に各解析方法により求めた 500 ターン分のビームサイズの平均と標準偏差を示した。誤差の範囲を考慮し、新しいアルゴリズムにより算出されたビームサイズが従来の結果と一致していることが分かる。しかし、全体的にばらつきが大きいため、精密な結果であるとは言い難い。これは、アルゴリズムからの出力される結果が安定していないことを意味し、今後改善すべき課題である。

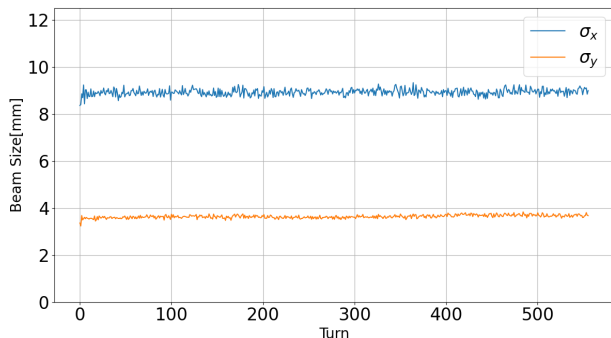


Figure 4: 従来の方法によるビームサイズ算出結果

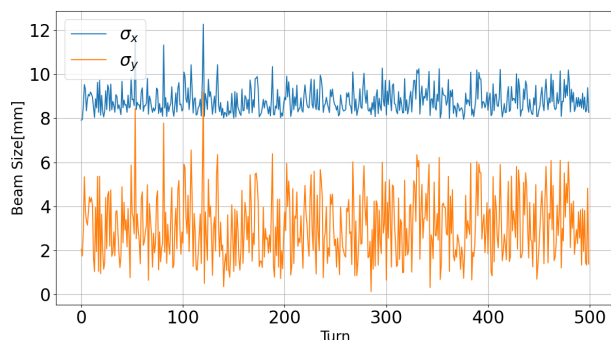


Figure 5: 新しいアルゴリズムによるビームサイズ算出結果

Table 3: ビームサイズ測定と比較

Parameter	Result
$\sigma_{x,prev}$	8.9206 ± 0.138 mm
$\sigma_{y,prev}$	3.6381 ± 0.069 mm
$\sigma_{x,gen}$	8.8076 ± 0.594 mm
$\sigma_{y,gen}$	3.0849 ± 1.503 mm

500 ターン分の解析の平均が従来の結果とある程度一致することから、1 ターン分のビームのデータを新しいアルゴリズムを用いて 600 回解析し、従来の結果との差 (Eq. (5)) を確認した。600 回繰り返すときのアルゴリズムの設定は同じで、プログラムの乱数のシード (Random Seed) のみが異なる。ここでシードとは、プログラム内の疑似乱数を生成する種となる値である。このランダムシードはプログラムが始まる時刻の値に設定した。その差を集計しヒス

トグラムに図示したのが Fig. 6 である。Figure 6 の左は水平方向のビームサイズの誤差 $\Delta\sigma_x$ を、右は垂直方向のビームサイズの誤差 $\Delta\sigma_y$ を表す。

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_x &= \sigma_{x,prev} - \sigma_{x,gen} \\ \Delta\sigma_y &= \sigma_{y,prev} - \sigma_{y,gen}\end{aligned}\quad (5)$$

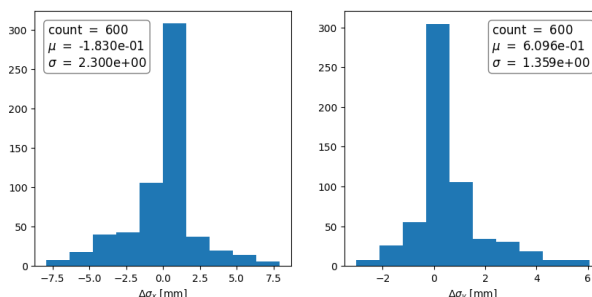


Figure 6: ビームサイズの誤差の分布

ここで、比較基準のビームサイズの値は、 $\sigma_{x,prev} \sim 9$ 、 $\sigma_{y,prev} \sim 3.5$ とした。600 回の解析の内、約 50% 程度の結果が 0 に集まっていることが確認できる。これは、同じ解析を十分な回数繰り返すことでより正確かつ精密な解を算出されると考えられる。しかしながら、この結果は約 50% の確率で正しくない解が出力される意味であり、これは望ましくない挙動である。今後より正確な解が出力できるよう改良する必要がある。

Figure 5 と Figure 6 から、各ターンを十分な回数繰り返しながらターン毎の解析をすることで、より正確かつ精密な解析ができると考えられる。しかし、現在一つのターンの解析の所要時間は約 5 分であり、500 ターンを各 1 回ずつ解析すると 40 時間が必要となる。よって、もし各ターンを 500 回計算する場合、500 ターンの解析に約 2 年が必要となる。これは現実的ではないため、今後アルゴリズムの性能向上のもう一つの課題である。

5. まとめと今後の展望

大強度ビームのビームロスの低減のため、ビームの Twiss パラメータのミスマッチによるビームサイズ振動を抑制する必要がある。そのためビームサイズを測定する 16 電極ビームモニターの開発を行っている。現在 16 電極ビームモニターのためのビームサイズ推定アルゴリズムのプロトタイプを開発した。また、新しく開発したアルゴリズムを用いたビームサイズの算出結果と従来の解析結果との比較を行い、ビームサイズの測定結果の傾向は一致しているが、ばらつきが大きいので正確な解析までは至らなかったことを確認した。最後に、同じデータを繰り返し推定することで、誤差が 0 に近い結果を算出できることを確認し、今後のアルゴリズムの改良の方向を確かめた。

現時点のアルゴリズムの性能は、まだ改良の必要性が高い状態である。まず、アルゴリズムの処理速

度を高速化し、より短時間で解析ができるようになる必要がある。また、アルゴリズムのプロセスの改良を行い、推定性能を向上させ最適解のばらつきが小さい解析ができるようにすることも課題である。最後に、新しく開発したアルゴリズムによって得られた解の一意性を確認することも必要である。今後アルゴリズムが改良され、実運用が可能な段階まで開発が進んだら、大強度ビームのロス低減に有効に活用できると期待される。

参考文献

- [1] <http://t2k-experiment.org/ja>
- [2] 中西芳枝 ”T2K 実験のための J-PARC MR における多電極ビームモニターの開発”, Kyoto Univ., Master thesis, 2016.
- [3] 宇野亘 ”J-PARC MR 加速器における 16 電極モニターの処理回路データ取得システムの開発”, Kyoto Univ., Master thesis, 2017.
- [4] 田島正規 ”T2K 実験のための J-PARC MR における 16 電極モニターの開発及び非破壊エミッタンス測定”, Kyoto Univ., Master thesis, 2019.
- [5] TOYAMA Co., Ltd; <https://www.toyama-jp.com>
- [6] 李耀漢 ”T2K 実験のための J-PARC MR における 16 電極モニターのビームプロファイル測定アルゴリズムの開発”, Kyoto Univ., Master thesis, 2021.
- [7] S.Haciomeroglu, Z.Omarov, ”Machine learning assisted non-destructive transverse beam profile imaging”, 2020; <https://arxiv.org/abs/2010.15243>