

高精度ペッパーポット型エミッタンスモニターの開発 DEVELOPMENT OF HIGH-ACCURACY PEPPER POT EMITTANCE MONITOR

森田 泰之^{*,A)}, 長友 傑^{A)}, 中島 悠太^{B)}

Yasuyuki Morrita^{*,A)}, Takashi Nagatomo^{A)}, Yuta Nakashima^{B)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

^{B)} Osaka University Institute for Dataability Science

Abstract

At the RIKEN Nishina Center (RNC), emittance measurements are performed by Low Energy Beam Transport using a Pepper-Pot Emittance Monitor (PPEM). The major advantage of PPEM is that it is possible to obtain 4D information (x, x', y, y') at a time in a short period of time. On the other hand, it is difficult to match the holes in the pepper pot mask (PPM) with the image on the screen, and a major challenge remains in measurement accuracy. In general, the smaller the distance between the PPM and the screen in PPEM, the more the emittance is overestimated and the lower the measurement accuracy. However, as the distance increases, it becomes more difficult to match the hole on the PPM to the image on the screen, and an excessively large distance prevents accurate measurement. To solve this problem, we have devised a way to maximize the distance between the PPM and the screen within the range where accurate measurement is possible by making the distance between the PPM and the screen variable. In this work, we developed a new analysis method for this variable-distance PPEM that uses optical flow to track changes in the beam spots on the screen when the distance between the PPM and the screen is varied. This allows a larger distance than conventional analysis methods and improves the accuracy of the measurement by more than 10%. This method is already in practical use, and all analysis can be performed with the click of a button.

1. はじめに

低エネルギービームのエミッタンスを正しく把握することは、後続加速器へビームを効果的に入射することができるのみならず、イオン源や Low Energy Beam Transport (LEBT) の開発においても非常に重要である。理研線形加速器 'RILAC' [1] の LEBT では、ペッパーポット型エミッタンスモニター (PPEM) を 2 台活用し、ビームの入射効率向上・イオン源開発に活用している。PPEM の特徴として、 (x, x', y, y') の 4 次元分布を取得することが可能であることと、高速でエミッタンス測定を行えることがあげられる。一方でペッパーポットマスクの穴とスクリーン上の像の対応付けが困難であり、マスクとスクリーン間の距離が大きくできない。その結果、測定精度が向上させにくいという欠点がある。今回、マスクとスクリーン間の距離を可変とした PPEM において、マスクとスクリーン上の像を正しく対応付けする手法を開発し、PPEM の課題である測定精度向上を行った。

2. PPEM の課題

PPEM では、ペッパーポットマスク上の穴によって切り出されたビームを下流で測定する。このマスクの穴の位置が実空間分布 (x, y) を定める。その為、穴の間隔が狭いほど (x, y) の測定精度は向上する。RILAC の LEBT では 2 mm 幅で 100 μm の穴が開いたタングステン板をマスクとして採用している。一方で角度分布 (x', y') は下流で測定された分布とマスクの穴を対応付けることで算出される。RILAC の LEBT では、下流の分布測定はマイクロチャンネルプレート (MCP) を用いて発光させ、その様子を CMOS カメラで撮影している。このカメラ

の解像度は決まっているため、角度分解能を向上させるためにはマスクとスクリーン間の距離をどれだけ大きくできるかに依存する。加えて、マスクの穴のサイズによる影響はマスクとスクリーン間の距離が大きくなるほど無視できるようになるため、エミッタンス測定の確度が向上する。一般的に、PPEM の解析では測定した画像を見ながら、格子状に境界を定めることでマスクの穴とスクリーン上の像の対応付けを行う。その様子を Fig. 1 に示す。

一方でこの手法では、マスクとスクリーン間の距離を大きくすると下流のスクリーン上での広がりが大きくなる。特に ECR イオン源のビームでは 2 つや 3 つに分かれることも少なくない。複数要素に分かれたり、像同士が重なってしまうとどの穴から来た像かを判定するこ

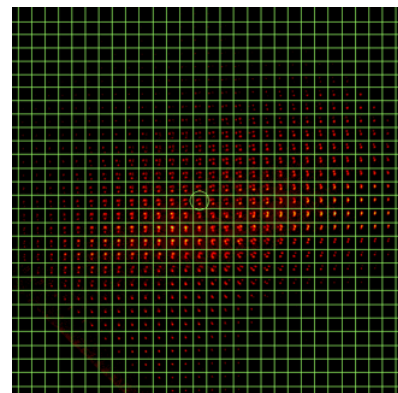


Figure 1: Mask hole and beam spot correspondence during a typical analysis. The mapping is done by setting the boundaries in the form of a mesh as shown in the green line.

* yasuyuki.morita@riken.jp

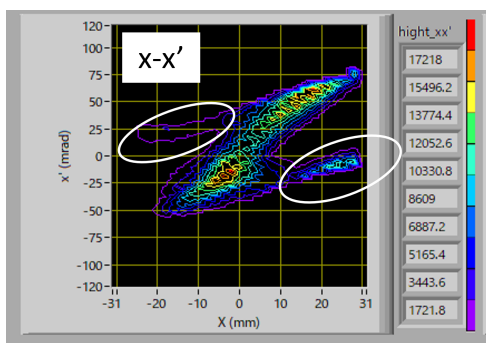


Figure 2: Analysis results of incorrect mapping of mask holes to images. The figure shows the $x-x'$ phase space distribution. As a result of the incorrect mapping, the image is plotted in a region that does not originally exist, as circled by the white line, causing obvious deformation.

とができなくなる。正確な対応付けができなくなると、Fig. 2 に示すように解析結果の位相空間分布上で変形が起こり、明らかに誤った解析結果が出力される。Figure 2 は $^{14}\text{N}^{4+}$ ビームに対し、マスクとスクリーン間の距離を 24.7 mm とした際の測定結果である。このような変形が起こる距離は、マスクの穴の間隔とビームの位相空間分布に依存する。その為、マスクとスクリーン間の距離の設定は慎重に行う必要がある。

3. OPTICAL FLOW を用いた解析手法

マスクとスクリーン間の距離を定めるにあたり、我々はステッピングモーターによって距離を変更できる PPEM の開発を行った [2]。これによりビームの位相空間分布に応じて距離を変え、解析結果に変形が起こらない最大の距離で解析を行ってきた。この手法によって穴と像の対応付けを誤ることはなくなったが、過剰に距離を離すと変形が起こることは避けられず、装置として取れる最大の距離までマスクとスクリーン間の距離を大きくすることはできずにいた。そこで我々はマスクとスクリーン間の距離が可変であることを利用し、距離の異なる複数の画像を撮影し、像の変位を追跡する手法の開発を行った。本開発によって装置として取れる最大の距離までマスクとスクリーン間の距離を大きくすることで、測定精度を向上させることが可能となる。

像の変位を追跡するために、画像処理手法の一つである Optical Flow [3] を導入した。Optical Flow とは、連続した 2 枚の画像に対して、その画像間の微小な変位をベクトルとして計算することができる。我々は Optical Flow のうち、全ピクセルに対して計算を行うことで像の微小な変形に対応が可能である、Gunnar Farneback 法 [4] という手法を用いた。Optical Flow を用いたエミッタンス解析は次の手順で行った [5]。

1. 最も近い距離で画像を撮影し、マスクの穴と像の対応付けを行う。
2. わずかに距離を離し、画像を撮影する。
3. 2 で撮影した画像とその直前に撮影した画像に対し、Optical Flow で像の変位の計算を行う。
4. 計算結果をもとに、変位後の像の (x, y) 情報を書き

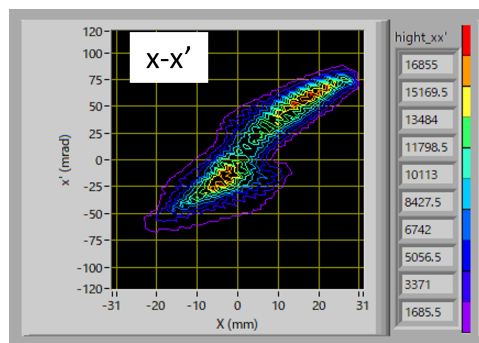


Figure 3: Analysis results using Optical Flow. The deformation that occurred in Fig. 2 has been eliminated, and it was confirmed that correct analysis was performed even when the distance between the mask and the screen was increased to the limit of the device.

換える。

5. 2-4 を繰り返す。

階的に距離を変えることで、像の変位を微小なものに抑えることが可能になる。そして全距離で (x, y) 情報を書き換え、それを参照することで最も距離に近い状態で行ったマスクの穴と像の対応付けを維持することができる。Optical Flow の計算は Python [6] のライブラリである OpenCV [7] を用いて行った。LabVIEW [8] によってエミッタンスの解析コードを作成し、LabVIEW から Optical Flow を計算する Python コードを呼び出し実行している。これにより PPEM の画像の取得、Optical Flow の計算の実行、Optical Flow の計算結果による補正をそれぞれボタン操作 1 つで行うことができる。実際の測定時間は画像の取得が 1 分未満、Optical Flow の計算には 15 枚の画像に対し 1 分ほどの計 2 分前後で全ての解析が可能であり、十分実用化されていると言える。

4. 結果

Figure 2 と同じデータに対し、Optical Flow を用いた解析を行った結果を Fig. 3 に示す。Figure 2 ではマスクの穴と像の対応付けを誤り変形が起こっていたが、Fig. 3 ではその変形がなくなり、正しくエミッタンスの解析が

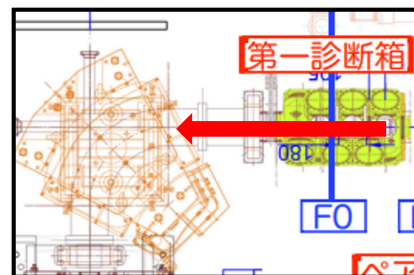


Figure 4: LEBT with beam transport simulation. The PPEM is installed at the downstream port of the first diagnostic box. The exit of the bending magnet is 1405 mm upstream. Beam transport simulations were performed from the PPEM to the exit of the bending magnets.

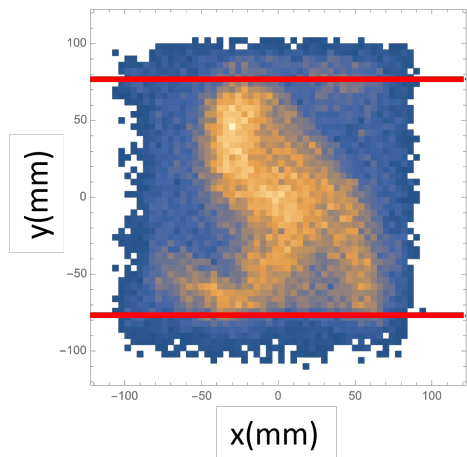


Figure 5: Results of beam transport simulation with the distance between mask and screen set to 16.6 mm, where no deformation occurs, and with the analysis results without Optical Flow. The red lines show the aperture of the bending magnet. The transmission efficiency of the aperture was 92.5%.

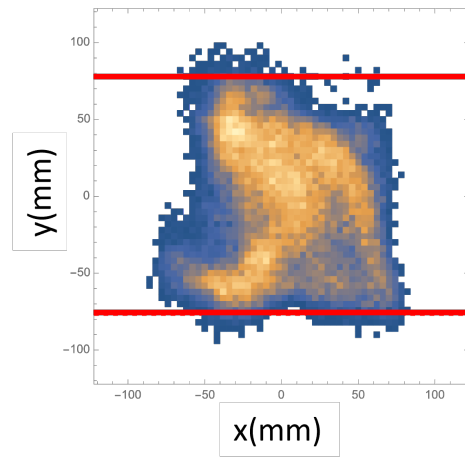


Figure 6: Results of beam transport simulation with the distance between mask and screen set to 24.7 mm and analysis results when Optical Flow is used. 24.7 mm is the maximum distance that can be varied as a device. The red lines show the aperture of the bending magnet. The transmission efficiency of the aperture was 99.3%.

行われていることが確認できた。これにより従来の解析手法では不可能であった、装置の限界である 24.7 mm までマスクとスクリーン間の距離を大きくすることができた。次に、エミッタンス測定精度が向上したことを確認するため、ビーム輸送シミュレーションによる検証を行った。検証では Fig. 4 に示すように、PPEM のある診断箱 1 を始点とし、1405 mm 上流の偏向電磁石の出口までのドリフトスペースのビーム輸送シミュレーションを行った。PPEM で測定されたビームは偏向電磁石を通過しているため、エミッタンスを正しく測定できていれば 100% のビームが変更電磁石の開口部に収まるはずである。本検証は Fig. 2,3 とは別の $^{51}\text{V}^{13+}$ ビームでの解析結果を使用した。Optical Flow を使用した解析では装置の限界である 24.7 mm まで変形が確認されなかったため、その解析結果を用いてビーム輸送シミュレーションを行った。また、従来の解析手法との比較も同時に行った。従来の解析手法では 16.6 mm を超えると位相空間分布上で変形が確認されたため、変形のない最大の距離として 16.6 mm の解析結果を比較対象として使用した。

Figure 5 は、従来の解析手法で変形が起こらない 16.6 mm でのエミッタンス測定結果を使用してビーム輸送シミュレーションを行った結果である。透過効率は 92.5% であり、マスクとスクリーン間の距離が不十分であり、エミッタンス測定精度が低下したことによる影響が表れている。一方で Fig. 6 は、Optical Flow を使用した解析で、マスクとスクリーン間の距離を 24.7 mm とした際のビーム輸送シミュレーションの結果である。図中の赤い線は偏向電磁石の開口部であり、透過効率は 99.3% と、ビームの大半が変更電磁石の開口部に収まっていることが確認できる。加えて Fig. 5 に比べ、Fig. 6 の像がよりシャープになっている。これはマスクとスクリーン間の距離を大きくしたことによって角度分解能が向上したことを示している。これらの結果より、Optical Flow を使用した新たな解析手法の導入によってマスクとスクリー

ン間の距離を十分に大きくすることが可能となり、エミッタンス測定精度が向上したといえる。

5. まとめ

PPEM の角度分解能はマスクとスクリーン間の距離に強く依存する。我々は測定精度を向上させるため、マスクとスクリーン間の距離を可変にする装置を導入し、運用してきた。従来の解析手法では、距離が可変であることを利用し、マスクとスクリーン間の距離が小さいところで対応付けを行い、最初に行った対応付けを維持できる最大の距離で解析を行ってきた。今回、新たに Optical Flow を使用した解析手法を開発し、距離の変化による画像内の変位を追跡することに成功した。これにより従来の解析手法ではマスクの穴と像の対応付けを誤る 24.7 mm まで距離を大きくすることが可能になった。この 24.7 mm は装置の限界であり、ビームラインや装置の設計によってはより大きな距離までマスクとスクリーンを離すことができると考えられる。ビーム輸送シミュレーションを使用した検証によって、従来の解析手法では上流の偏向電磁石の開口部まで戻した際の透過効率が 92.5% であったのに対し、Optical Flow を使用した新たな解析手法では透過効率は 99.3% であった。また、像がよりシャープになっていることも確認された。これらの結果より、Optical Flow を使用しマスクとスクリーン間の距離を大きくすることで測定精度が向上していることが確認できた。本手法については、LabVIEW と Python を用いて制御・解析システムを構築し、データの取得、Optical Flow の計算、Optical Flow を使用した解析をそれぞれボタン 1 つで実行可能になっている。測定時間については、15 枚の画像を取得するのに 1 分弱、取得した 15 枚の画像に対して Optical Flow の計算に 1 分程度であり、約 2 分で全ての解析を行うことができ、十分実用化されたといえる。今後は理研仁科センターの全イオ

ン源のビームエミッタンス測定に距離可変の PPEM と Optical Flow を用いた解析手法の活用を予定しており、既に 18GHz ECR イオン源 [9] への導入が行われている。

参考文献

- [1] M. Tamura, T. Ohki, H. Yamauchi, K. Oyamada, A. Yusa, K. Kaneko, E. Ikezawa, Y. Watanabe, O. Kamigaito, Present status of rilac, Proceedings of the PASJ2019, Kyoto, Japan, Aug. 2019, FSPI010, PASJ2019 (2019).
- [2] T. Nagatomo, V. Tzoganis, J. Mira, T. Nakagawa, O. Kamigaito, Residual gas effect in lebt on transverse emittance of multiply charged heavy ion beams extracted from ecr ion source, in: AIP Conference Proceedings, Vol. 2011, AIP Publishing, 2018.
- [3] B. K. Horn, B. G. Schunck, Determining optical flow, Artificial intelligence 17 (1-3) (1981) 185–203.
- [4] G. Farneböck, Two-frame motion estimation based on polynomial expansion, in: Image Analysis: 13th Scandinavian Conference, SCIA 2003 Halmstad, Sweden, June 29–July 2, 2003 Proceedings 13, Springer, 2003, pp. 363–370.
- [5] Y. Morita, T. Nagatomo, Y. Nakashima, Development of an image analysis method for pepperpot emittance monitors, in: Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2743, IOP Publishing, 2024, p. 012071.
- [6] <https://www.python.org/>
- [7] <https://opencv.org/>
- [8] <https://www.ni.com/ja-jp/shop/product/labview.html>
- [9] T. Nakagawa, Y. Higurashi, M. Kidera, T. Aihara, M. Kase, Y. Yano, Production of multi-charged ions in the riken 18 ghz ecris, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 226 (3) (2004) 392–400.