

AIによる中空ビーム制御手法の開発

DEVELOPMENT OF HOLLOW BEAM CONTROL METHOD BY AI

森田泰之^{#,A)}, 福田光宏^{A)}, 百合庸介^{B)}, 友野大^{A)}, 依田哲彦^{A)}, 神田浩樹^{A)},
畑中吉治^{A)}, 中尾政夫^{C)}, 安田裕介^{A)}, 中島悠太^{D)}, Koay Hui Wen^{A)}, 武田佳次郎^{A)},
原隆文^{A)}, 大本恭平^{A)}, 久松 万里子^{A)}, 荘 俊謙^{A)}

Yasuyuki Morita^{#,A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Yosuke Yuri^{B)}, Dai Tomono^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hiroki Kanda^{A)},
Kichiji Hatanaka^{A)}, Masao Nakao^{C)}, Yusuke Yasuda^{A)}, Yuta Nakashima^{D)}, Huiwen Koay^{A)}, Keijirou Takeda^{A)},
Takahumi Hara^{A)}, Kyouhei Omoto^{A)}, Mariko Hisamatsu^{A)}, Tsunhim Chong^{A)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics (RCNP)

^{B)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and
Technology

^{C)} Gunma University

^{D)} Osaka University Institute for Dataability Science

Abstract

Currently, we are studying a new method to generate an intense muon beam with a proton hollow beam at MuSIC (MUon Science Innovative Channel) in the Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University. The proton hollow beam has a large possibility to improve low-energy muon beam intensity and degree of polarization. However, we need a lot of time to optimize magnet alignments and beam shapes with an existing simulation method. In order to simulate an ideal hollow beam condition within a reasonable cpu time, it is indispensable to develop a new efficient method to design the beam line. Here, we propose to employ new technology to recognize images using Artificial Intelligence (AI) for this purpose and to apply it to discriminate beam shape images obtained by the simulation study. In this report, we show that the AI learned by the dummy image can accurately judge the shape of the hollow beam obtained by the simulation.

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター(Research Center for Nuclear Physics, RCNP)のミュオン施設(MuSIC)では、日本で唯一の DC ミュオン源として非破壊元素分析や μ SR 測定など様々な実験を行っている。これらの実験精度向上のために、ビームの大強度化、ミュオンの偏極度の向上が MuSIC の課題としてあげられる。その一案としてミュオン生成ターゲットへの陽子ビームの照射方法の改良が検討されている。現状、円柱形の炭素標的の中心部分に集中して陽子ビームを照射している。これを標的の中心ではなく、縁にビームを集中させることで

利用できるビーム量の増加・偏極度の向上が見込まれる。

標的の縁への陽子ビーム照射するためには、QST 高崎にて開発をされた多重極電磁石を用いた中空ビームの生成技術[1-8]を MuSIC 生成標的への陽子ビームラインに適用する必要がある。中空ビームは多重極電磁石を使用するため、輸送行列を用いたビームのシミュレーションができない。そのため、運動方程式を解いていく必要があり、計算に時間がかかってしまう。そこで今回、まずはシミュレーションによって中空ビームを MuSIC のビームライン上で再現可能かどうかの検証、並びに効率的な計算を行う方法として人工知能(AI)を用いた制御手法の開発状況について報告する。

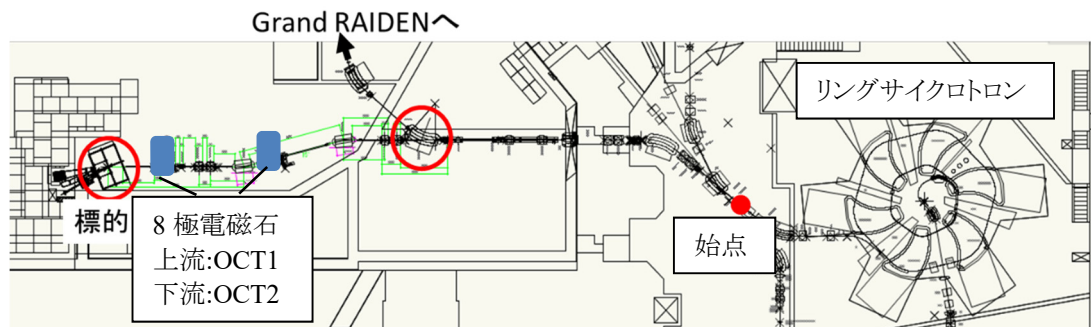


Figure 1: Schematic of hollow beam transport line.

[#] morita16@rcnp.osaka-u.ac.jp

2. 中空ビームの生成

2.1 中空ビームに関して

中空ビームは 8 極電磁石などの多重極電磁石を用い、非線形磁場によってビームを収束させることによって、ビームの裾が内側に折りたたまれる。その結果、ビームの中心部分のビーム強度に対して半径方向外側のビーム強度が高い“中空化”が起こる。

2.2 トラッキングシミュレーション

MuSIC のミュオン生成ターゲットへの中空ビームの照射を行うにあたり、粒子トラッキングシミュレーションを行い、ビーム輸送ラインの設計を行った。今回のシミュレーションでは運動方程式を解くことで 12 極までの多重極電磁石を考慮することができるビーム輸送コードを使用した。[3]

ビーム光学系は RCNP のリングサイクロトロン直後のフォーカスポイントを始点として MuSIC のミュオン生成ターゲット表面で中空化するように設計する。始点では初期条件として、392MeV の陽子ビームで rms エミッタンス $\epsilon_{rms} = 0.5 \pi \text{ mm mrad}$ 、半径 $r_{rms} = 0.5 \text{ mm}$ のガウシアン分布のビームを仮定した。この時、エネルギー分散 $dE/E = 0$ とした。また、本ビームラインは途中まで高分解能実験施設 Grand Raiden と共通している(Fig. 1)。

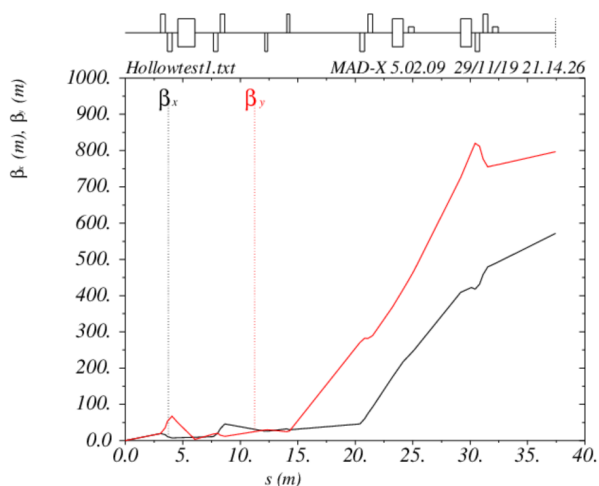


Figure 2: Calculation of optical system by MAD-X.

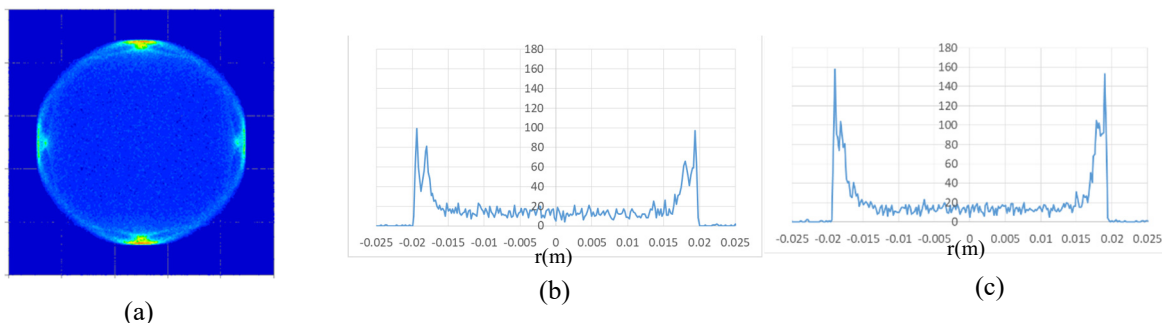


Figure 3: Beam shape on muon-generated target. (a) x-y distribution, (b) Intensity distribution on the x-axis, (c) Intensity distribution on the y-axis.

そのため、Grand Raiden と分岐後に 8 極電磁石を 2 台配置し、共通部分のマグネットの配置は変更していない。

設計においてまず MAD-X[9]によってエンベロープの計算を行った。MAD-X では輸送行列計算であるため、8 極電磁石の効果抜きにして計算を行い、主に上流側の 8 極電磁石でのビーム条件を定めるために計算を行った (Fig. 2)。その後、運動方程式を解くビーム輸送コード [10]によって 8 極電磁石の非線形磁場を利用した中空ビームの検証を行った(Fig. 3)。

今回の設計では、ミュオン生成標的の縁に集中して陽子ビームを照射することを目的としており、標的の形状である半径 20mm のわずかに内側、半径

19.5mm に照射することを目指しており、本結果より、標的の縁に照射が可能であるといえる

3. AI 技術による制御手法の開発

中空ビームのシミュレーションでは、多重極電磁石を使用するため、通常の輸送行列計算では計算できず、運動方程式を解いてシミュレーションする必要がある。したがって輸送行列計算の場合に対し、計算に多くの時間を必要とする。したがって効率的に計算を進める手法の開発が必要である。そこで今回、機械学習などの AI 技術を応用することでより効率的、かつ完全自動化の実現を目指す。

3.1 AI 制御の課題

AI 制御では、望む形状のビームを生成するために、8 極電磁石の K 値を効率的に調査する必要がある。しかし、中空ビームでは 8 極電磁石の K 値によって様々な形状のビームを生成することが可能である(Fig. 4)。したがって 8 極電磁石の K 値を制御する上でビームが望む形状になっているのか、中空化しているのかなど、ビームの形状を判断することが必須である。そこで今回、ビームの形状を判別する AI の開発を行った。

3.2 画像認識によるビーム形状判断

今回、AI の画像認識技術を応用し、ビーム形状判断を行う。本研究で取り扱いビーム形状の画像は $401 \times 401 \text{ pixel}$ と AI で取り扱うには比較的大きな画像である。

そこで Convolutional Neural Network (CNN)[11]を用い、学習を行った。今回の CNN では Convolutional 層が 4 層、Pooling が 1 層、全結合層が 2 層、出力層が 1 層という構成になっている。Convolutional 層、全結合層で

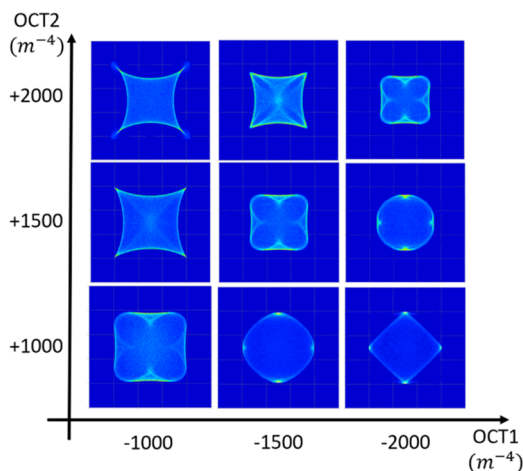


Figure 4: Relation between K value of octopole magnet and beam shape.

は活性化関数として ReLU 関数を採用しており、これは入力値が 0 以下ならば 0 を、0 以上であれば入力された値を出力する関数である。Pooling 層では Max-Pooling を採用した。出力層では各場合の確率を出力する softmax 関数を採用している。これにより、画像を入力するとこちらで設定した各形状である確率が出力され、その確率が最大のものを AI の形状判断として採用する。

本手法では学習を行うにあたり、大量の画像が必要となる。したがって今回は、ダミー画像(Fig. 5)を大量に生成することで学習用データとした。ダミー画像は、まず一様に分布させたものと、縁にのみ分布させたものを足し合わせて生成している。ダミー画像の形状や半径、ビームの分布や縁の比率を Table 1 のような条件で変更したものを、円形、四角形、星芒形、ひし形、その他(主に中空化していないもの)を合わせて 90000 枚の画像を用意した。

ダミー画像で学習させた AI の評価を行うにあたり、ビーム輸送シミュレーションで得られた円形、四角形、星

Table 1: Variation of Dummy Image

	最小値	最大値
半径	0.5 mm	35 mm
縁の割合	20 %	70 %
短径/長径	0.2	0.95
縁の幅	0.1 mm	半径/10 mm

Table 2: CNN Output when the Simulation Result is Input (Probability of Each Shape)

	円形 (1:1)	円形 (1:n)	四角形 (1:1)	四角形 (1:n)	星芒形 (1:1)	星芒形 (1:n)	ひし形 (1:1)	ひし形 (1:n)	その他
円形	9.29E-1	9.58E-6	6.91E-2	1.4E-3	2.86E-8	8.26E-9	9.38E-9	6.92E-13	9.96E-10
四角形	1.08E-28	0	1	7.52E-19	1.98E-15	0	0	0	0
星芒形	1.07E-9	1.04E-11	4.64E-6	3.85E-10	1	7.57E-5	6.45E-7	7.65E-15	1.09E-8
ひし形	2.42E-9	1.35E-9	2.41E-7	1.17E-4	1.04E-9	7.67E-5	6.32E-6	1	2.41E-1

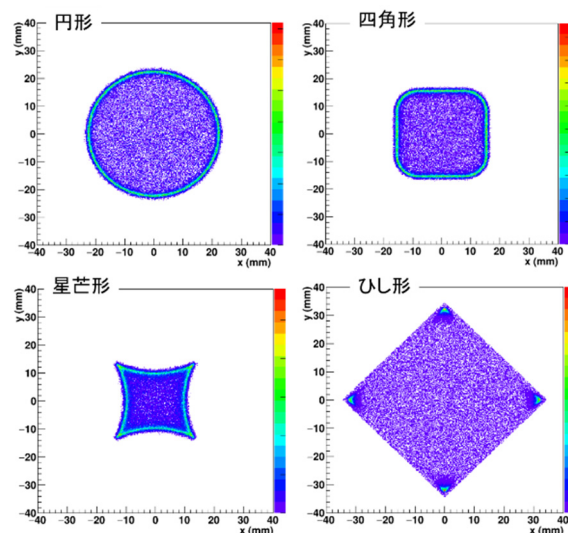


Figure 5: An example of a dummy image for learning.

芒形、ひし形の四枚の画像入力した際に、どの形状である確率が高いかという出力を Table 2 に示す。

Table 2 より、今回のテストに関してダミー画像で学習した CNN でシミュレーションの形状を正確に判別できていることがわかる。今回の結果では、円形の判別において四角形である確率が約 7%あり、ひし形の場合、対角線の長さが等しくないひし形であると判別している。円形の画像の判別がわずかに曖昧を残している原因として肉眼では円形に見えているが、実際にはわずかに直線部分が残っており、それによって AI の判別が曖昧になっていると考えられる。より厳格にするためにはある長さ以下の直線部部分を含んでも円形であると学習させる方法がある。また、ひし形に関しても同様にわずかな違いに過敏に反応している可能性がある。しかし、ビームの半径(ピークの位置)は出力された画像のデータとして出力されているため、AI 技術に頼ることなく抽出でき、ひし形の場合のような問題に対して別途設定可能であり、今回の結果で十分に使用できると考えられる。

4. まとめ

現在、RCNP では MuSIC の改良案として生成標的への中空ビームの照射を検討している。そこで今回、シミュレーションによって MuSIC の生成標的への中空ビーム照射が可能な輸送ビームラインの設計を行った。本設計により、MuSIC の円柱形生成標的の半径 20mm に対し、半径約 19mm の円形の中空ビームの照射が可能であるという結果が得られた。これにより、MuSIC のミュオン

ビームの強度の増加並びに偏極度の向上が期待される。

また、中空ビームの制御手法の開発として AI 技術を応用したビーム形状の判別が可能となった。今回、学習データとしてダミーの画像を使用し、シミュレーションの結果を正確に判別することが可能となった。本技術は中空ビームの制御にとどまらず、一般的なビーム制御への応用の可能性を秘めている。

今後、効率的かつ自動での制御に向け、多重極電磁石の K 値のパラメーター探索手法の開発を行う。

参考文献

- [1] N. Tsoupas *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 (2007) 024701; <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.10.024701>
- [2] A. Bogdanov *et al.*, Proceedings of the 2007 Particle Accelerator Conference, Albuquerque, USA, 2007, pp.1748-1750;
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p07/PAPERS/TUPA5046.PDF>
- [3] Y. Yuri, T. Ishizaka, T. Yuyama, I. Ishibori, S. Okumura and K. Yoshida, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 642(2011) 10;
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.03.055>
- [4] S. Meigo, M. Ooi, K. Ikezaki, A. Akutsu, and H. Fujimori, Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, Dresden, Germany, 2014, pp. 896-898;
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/mopri116.pdf>
- [5] H. Kobayashi *et al.*, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2014, pp. 14-18;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAOL/SAOLP4.pdf
- [6] Y. Yuri, M. Fukuda, T. Yuyama, 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31-Aug. 3, 2019, pp. 112-115.
- [7] Y. Yuri, M. Fukuda, T. Yuyama, Proceedings of the 2019 International Particle Accelerator Conference, Melbourne, Australia, 2019, pp.184-186.
- [8] Y. Yuri, M. Fukuda, T. Yuyama, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 053G01.
- [9] <https://mad.web.cern.ch/mad/>
- [10] Y. Yuri, N. Miyawaki, T. Kamiya, W. Yokota, K. Arakawa, and M. Fukuda, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 (2007) 104001; <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.10.104001>
- [11] A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton, MPS 20J2, 2012; <https://papers.nips.cc/paper/4824-imagenet-classification-with-deep-convolutional-neural-networks.pdf>