



Title	A new adjustment method for ECR ion sources using machine learning
Author(s)	Morita, Yasuyuki
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/89553
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (森 田 泰 之)

論文題名

A new adjustment method for ECR ion sources using machine learning
(機械学習を用いた新たなECRイオン源制御手法)

論文内容の要旨

近年、中性子やミュオンなどの二次生成粒子ビーム高強度化や短寿命放射性同位元素の大量製造・供給のために、より大強度の加速器の需要が大幅に増加している。イオン源による大強度イオンビームの生成は、大強度加速器の開発における重要な課題の一つである。また、エミッタンスを指標とするビームの質の向上もイオン源から加速器に入射するビーム強度を減らさずに輸送するための重要な課題の一つである。加速器へのビーム透過率を高めるためには、入射ビームの位相空間における粒子分布を加速器の受け入れ可能な位相空間分布であるアクセプタンスと整合させる必要がある。ビームの大強度化と加速器のアクセプタンス整合の鍵を握るのは、イオン源および入射ビームラインの運転パラメーターを最適化している。しかし、複数のパラメーターが相互に影響しあい、また物理的に解明しきれていない部分があるため非常に複雑で時間を要する調整が必要である。誰が調整しても迅速かつ再現性良く、常にイオン源の性能を最大限引き出せるような高度な制御手法の開発は加速器の産業利用や社会実装を支える非常に重要な開発要素である。

本論文では、イオン源とビーム輸送系の調整パラメーター最適化のために、機械学習技術を初めて応用し、複数のパラメーターを同時に処理しながら、効率的に調整する手法の開発を目指した。人の手と経験による従来の制御では、各パラメーターの限られた範囲内で1パラメーターまたは2パラメーターの調整がやっとであった。これは、全てのパラメーターの組み合わせの結果を確認するのに膨大な時間がかかることと、人間の脳の処理能力に限界があるためである。そこで機械学習手法の一つであるベイズ最適化を応用した新たな調整手法の開発を行った。ベイズ最適化を用いることで複数のパラメーターを同時に制御し、ローカルマキシマムに囚われないように効率的に最適化するためのアルゴリズムを構築し、シミュレーション計算によりベイズ最適化法適用の妥当性を検証した上でECRイオン源'NANOGEN'を使って実験及びその性能評価を行った。この実験では、①ガスバルブの開閉量、②RFパワー、③RF周波数、④中間電極の電圧の計4つのイオン源制御パラメーターを調整し、ビーム強度(I)とエミッタンス(ϵ)の両方を考慮することができる指標、輝度(=

$\frac{I}{\epsilon_x \epsilon_y}$)を最大化させる調整を行った。その結果、従来手法では10時間ほど要する調整を約1.5時間で

$5.21 \times 10^{-5} \pi \text{ mm mrad}$ の輝度のビームを取り出すことに成功した。この結果は、多次元の広いパラメータ空間における極めて多数の組み合わせにもかかわらず、ビーム強度の増加とビームエミッタンスの減少を同時に行って最適解を短時間で見つけることができることを実証したものである。また、この調整手法を発展させることで再現性・信頼性の高い自動調整を行うことができるため、加速器の産業利用でやがんの放射線診断・治療などへの応用においても普及を促進する画期的な制御手法である。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (森田 泰之)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主 査	教授 福田 光宏
	副 査	教授 青木 正治
	副 査	教授 野海 博之
	副 査	教授 青井 考
	副 査	講師 依田 哲彦
論文審査の結果の要旨 近年、量子ビーム利用の多様化に伴い、中性子やミュオンなどの二次粒子ビームの高強度化や短寿命 RI の大量製造などのための大強度加速器のニーズは高まっており、イオンビームの供給源であるイオン源の高強度化及び加速器本体へのビーム輸送・入射効率の向上は加速器の大強度化を実現するための重要な課題として位置付けられる。本研究は、イオン源及び入射ビームラインの制御手法に機械学習を新たに導入し、イオン源や入射ビームライン機器の性能を最大限引き出して高強度且つ高品質なイオンビームを供給するための高度な制御技術の開発を目指したものである。これは、将来の加速器の産業応用に欠かせない高安定で信頼性の高い自動運転技術にもつながる革新的な加速器研究テーマでもあり、研究の意義や成果の波及効果も大きいと判断される。論文審査では、研究の意義と位置付け、研究目的を達成するための課題の設定と解決策、研究目標へアプローチするための手順と工夫、得られた結果に対する考察の妥当性と価値などに重点をおいて評価を行った。 本論文は、イオン源とビーム輸送系のパラメーター調整に最適な機械学習手法の選定、シミュレーション計算を用いたビーム輸送系機器制御へのベイズ最適化の適応性の評価、ベイズ最適化を用いたイオン源の実運転制御結果とその考察などから構成されており、論文の論理展開としては問題ないと考えられる。既にライブラリーとしてパッケージ化されたベイズ最適化ツールを最大限活用し、各パラメーターの物理的な役割を十分に理解した上で調整可能範囲を限定して複数の機器パラメーターを同時に処理しながら効率的に最適な条件を見出す制御手法を開発できたことは、従来の制御技術を大きく進展させるものとして高く評価できる。これまで運転員の経験と勘に頼っていた従来のマニュアル制御法では2パラメーターを同時に調整するのが限度であり、多数のパラメーターの膨大な組合せの中から最適解を見つけ出すことは極めて困難であった。ビーム強度の最大化とビームエミッタンスの最小化を両立させる調整にベイズ最適化を適用することによって複数のパラメーターを同時に効率的に制御し、従来手法では10時間ほど要する調整を約1.5時間で$5.2\text{e-}5\text{ (mA/(\pi mm}\cdot\text{mrad)}^2)$の輝度を達成できたことは特筆すべき成果であり、その学術的価値は極めて高い。 よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値あるものと認める。		