

加速器分野への機械学習の 応用を通じた人材育成の試み

加藤政博

広島大学 / 自然科学研究機構分子科学研究所

共同研究者

大山 博史^A, 池上 壮^A, 長谷 望叶^A, 笠井 聖二^B, 澤田康輔^B,
神尾 彬^C, 浅井 佑哉^C, 西原 佑^C, LU Yao^C,
島田 美帆^{C,D}, 宮内 洋司^{C,D}, 広田 克也^D, 帯名 崇^D, 本田 融^D

^A広島商船高専、^B呉工業高専、^C広島大学、^DKEK

KEK加速器科学国際育成事業 IINAS-NX 広島大学を中核とする加速器教育・研究拠点の形成



広島大学における加速器研究の高度化⇒加速器研究室の魅力向上 ボトムアップ型研究と先端加速器研究の連携

広大側の3教授は全員KEKの客員教授



放射光科学研究センター



理学部物理学科
先進理工学研究科



放射光物理研究室

加藤 政博 (教授)
島田 美帆 (特任准教授)
宮内 洋司 (特任准教授)

加速器物理研究室

栗木雅夫 (教授)
ザカリーリプタック (助教)

ビーム物理研究室

岡本宏己 (教授)
檜垣浩之 (准教授)
伊藤清一 (助教)

放射光源加速器

電子加速器

ハドロン加速器

PF

KEK-B

リニア
コライダ

JPARC



教育啓蒙活動

呉高専「物理科学」

- ・ 加速器モデルを持ち込んでの出前授業
- ・ 広島大放射光センターの見学+講義
- ・ KEK-PF制御室からのオンライン講義

● 高専の正規の授業の中で実施

● 来年度以降も継続・定着を目指す

オンライン講演会「加速器という仕事」

第1回 (9/10(土))

：住友重機械、パスコ、参加者61名

第2回 (12/6(火))

：金属技研、ハヤシレピック、参加者25名

第3回 (3月予定)

：KEK及び北大の技術職員

● 広報、運営、司会などを高専生が実施

● 来年度以降も継続・定着を目指す

遠隔見学・授業をセンターのアウトリーチ活動として継続的に実施

KEK見学会 (9月4-6日)

・ 広島大教員1名、学生6名

● 加速器に関心のある学生を現場へ

● コロナ下で一時期途絶えたが、継続的に実施したい

広島大学放射光センター

VR機器などを活用した遠隔見学など
2021, 2022年度で中高計7校

KEK 加速器総合育成事業オンライン講演会

KEK-DAY

加速器という仕事

日 時: 2022年9月10日(土) 13:30-15:30 (予定)

主 催: 広島大学放射光科学センター、呉工業高等専門学校
広島商船高等専門学校、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

詳しくは <http://www.kek.ac.jp/topics/2022kekday/>
参加には事前登録が必要です
登録方法は準備出来次第上記WEBページに掲載します



オンライン講演会 <ZOOMで開催、WEBで事前申し込み>

開会の挨拶

新井慶夫 高エネルギー加速器研究機構オープンイノベーション推進部長

講演

1. 加速器のすゝめ

小関 忠 先生 (高エネルギー加速器研究機構)

2. 加速器を設計・製作・運転するという仕事

谷口 愛実 先生 ((株)住友重機械工業)

3. 巨大加速器を精密測定するという仕事

三島 研二 先生 ((株)パスコ)

4. 加速器を作ってみよう

広田 克也 先生 (高エネルギー加速器研究機構)

閉会の挨拶

大山博史 広島商船高等専門学校 副校長

オンライン施設見学 (予定)

1. 広島大学放射光科学センターの加速器と実験装置
2. KEKの加速器施設
3. KEKの放射光実験装置
4. その他

<WEB上で公開、一部VRで視聴可>



呉高専



広島大学



広島商船



KEK
高エネルギー加速器研究機構

製作者: 呉高専建築学科三年 橋高

加速器教材作成

360度カメラ画像による 見学用VRコンテンツ



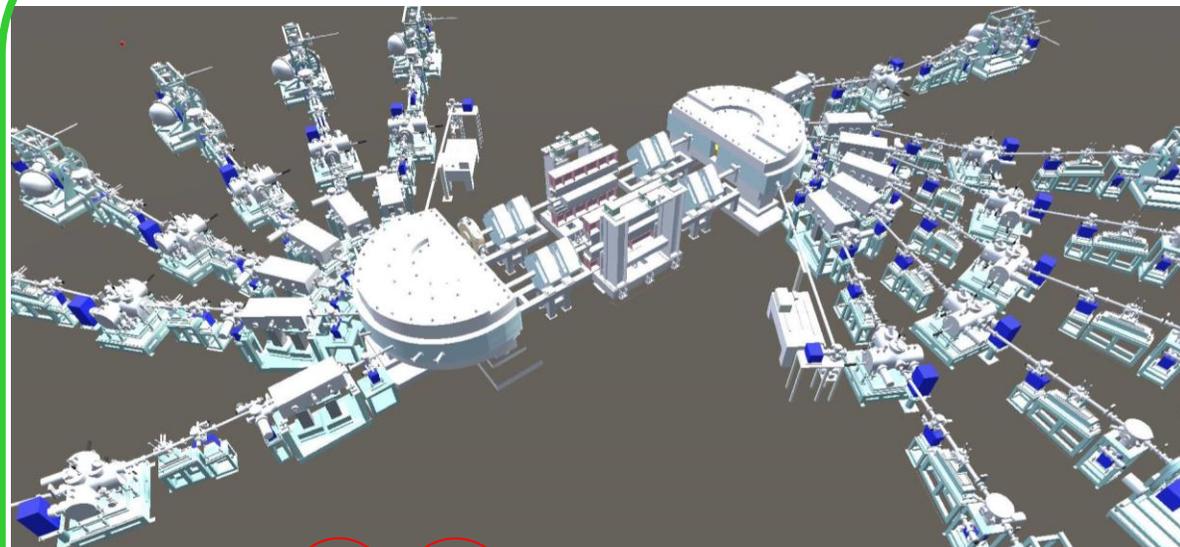
ツアーの作成

WPVRのツアー一覧画面の上部にあるAdd New Tourをクリックしてください。新規のツアーが自動的に作成され、編集画面に移動します。編集画面に移動した後、画面上部にあるツアーのタイトルを入力しておいてください。

ツアー全体の作成の流れとしては、**シーン全体を作成**→それぞれに**ホットスポット**の追加が楽だと思うので、マニュアルも同様の工程で解説していきます。

- 高専生による360カメラ撮像と見学用VRコンテンツ作成
- 作成マニュアルの整備
- マニュアルのWEB上での公開
- 授業や研究打合などでの利用の促進

3D CADデータに基づくVRコンテンツ



UNITYの操作画面

● KEKオープンイノベーション推進室講師によるVRコンテンツ作成講習会実施

● HiSOR 3D-CADデータによるコンテンツの試作

- データの圧縮技術の習得と実用化
- VRからAR,MRへ
- 利用法の探索

Hierarchy
Unity上に置くobjectのリスト
Main CameraとDirection Lightは最初配置されている

Scene
objectの基本操作画面

Game
実際に作ったものを表示させる画面

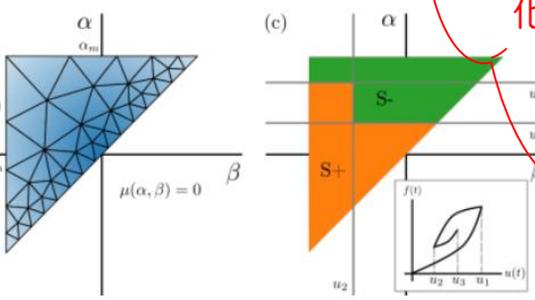
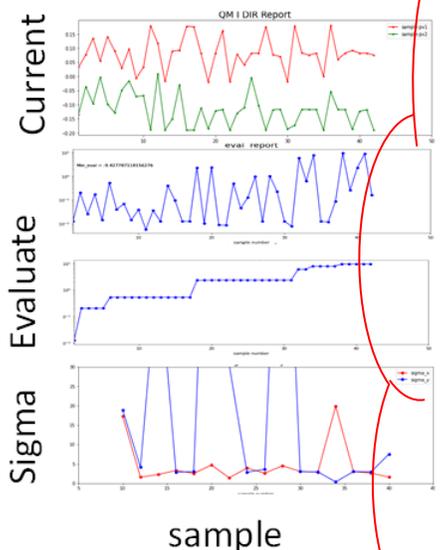
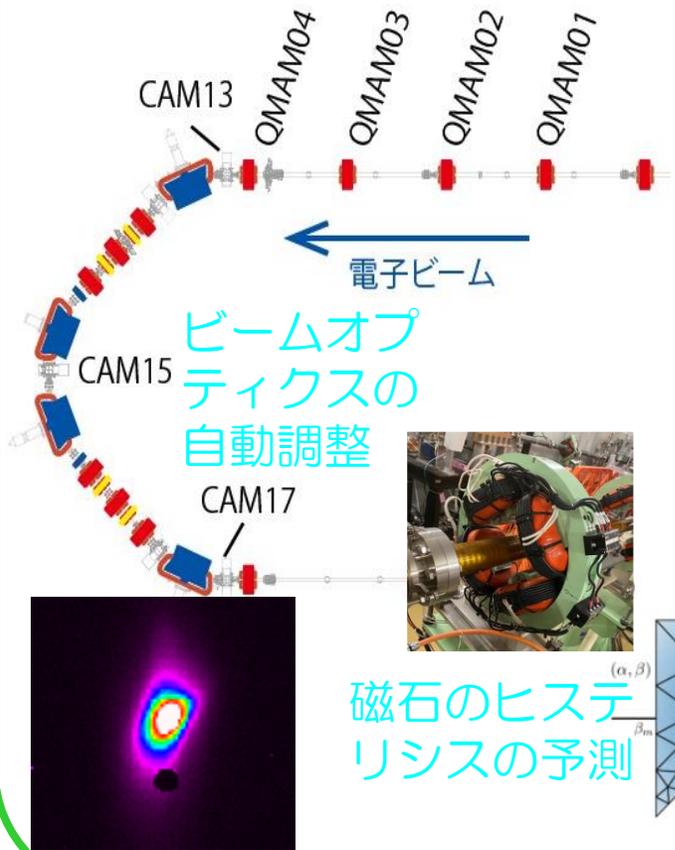
実行・停止ボタン
これを押すとobjectが動き出し、Game上でその様子を見ることができる

Inspector
Objectの各種パラメーター操作
Transform: objectの座標操作
その他objectによって色々なパラメーターがある

その他操作。Tabで切り替え
Project: C#の設定等をする時に利用
Console: エラーメッセージ等を表示

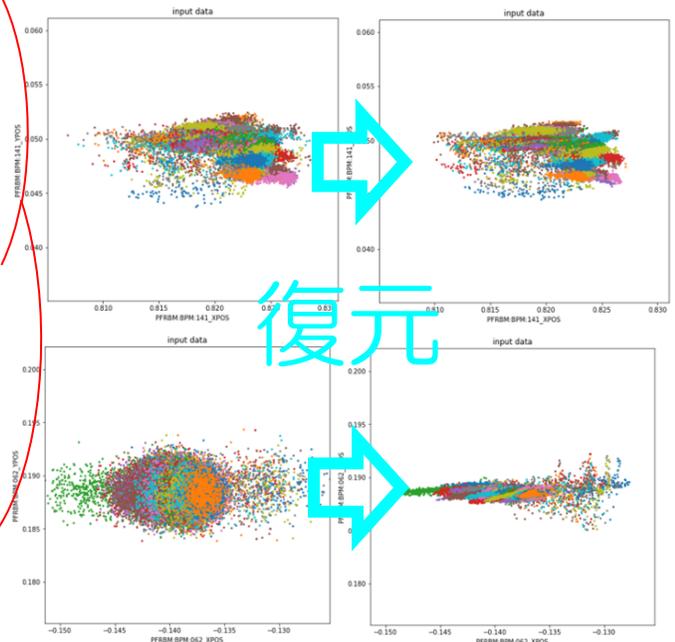
加速器分野への機械学習の導入

cERL試験加速器における磁気履歴を含む光学関数調整への機械学習の導入
(広島大学修士1名)

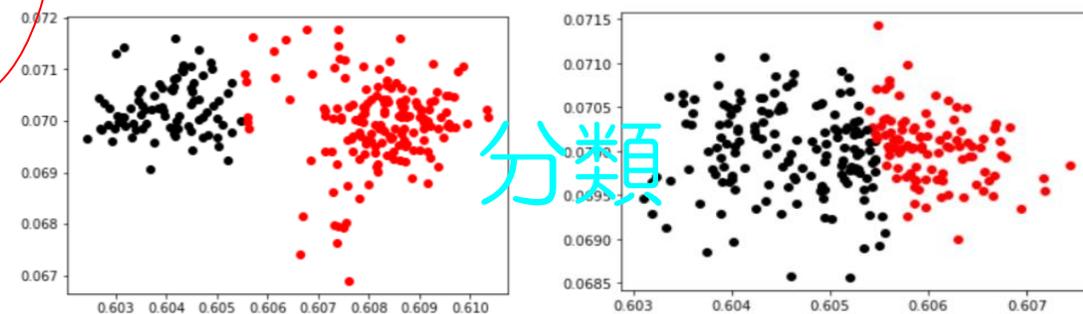


- 理研などから講師を招き初心者向けセミナー (2回)
- クラウドサービスの試用
- 加速器機械学習フォーラムへの参加
- 超初心者向けチュートリアル「誰でもできる機械学習」の整備
- 授業・見学などでの利用の促進
- 大学施設での省力化・自動化

Photon Factory 運転データへのアクセスと可視化
Photon Factory ビーム位置検出器データのオートエンコーダー法による解析と異常検出の試み
(呉高专卒研1名)

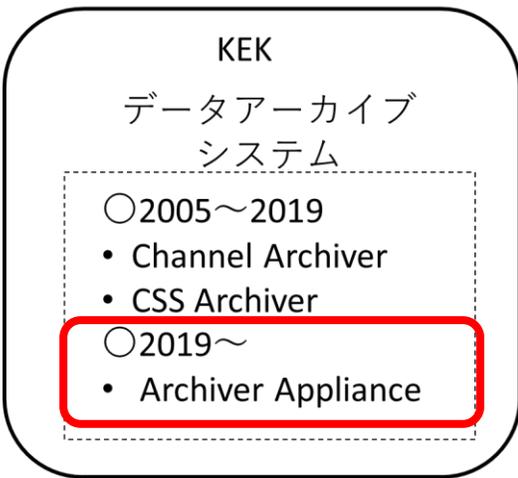
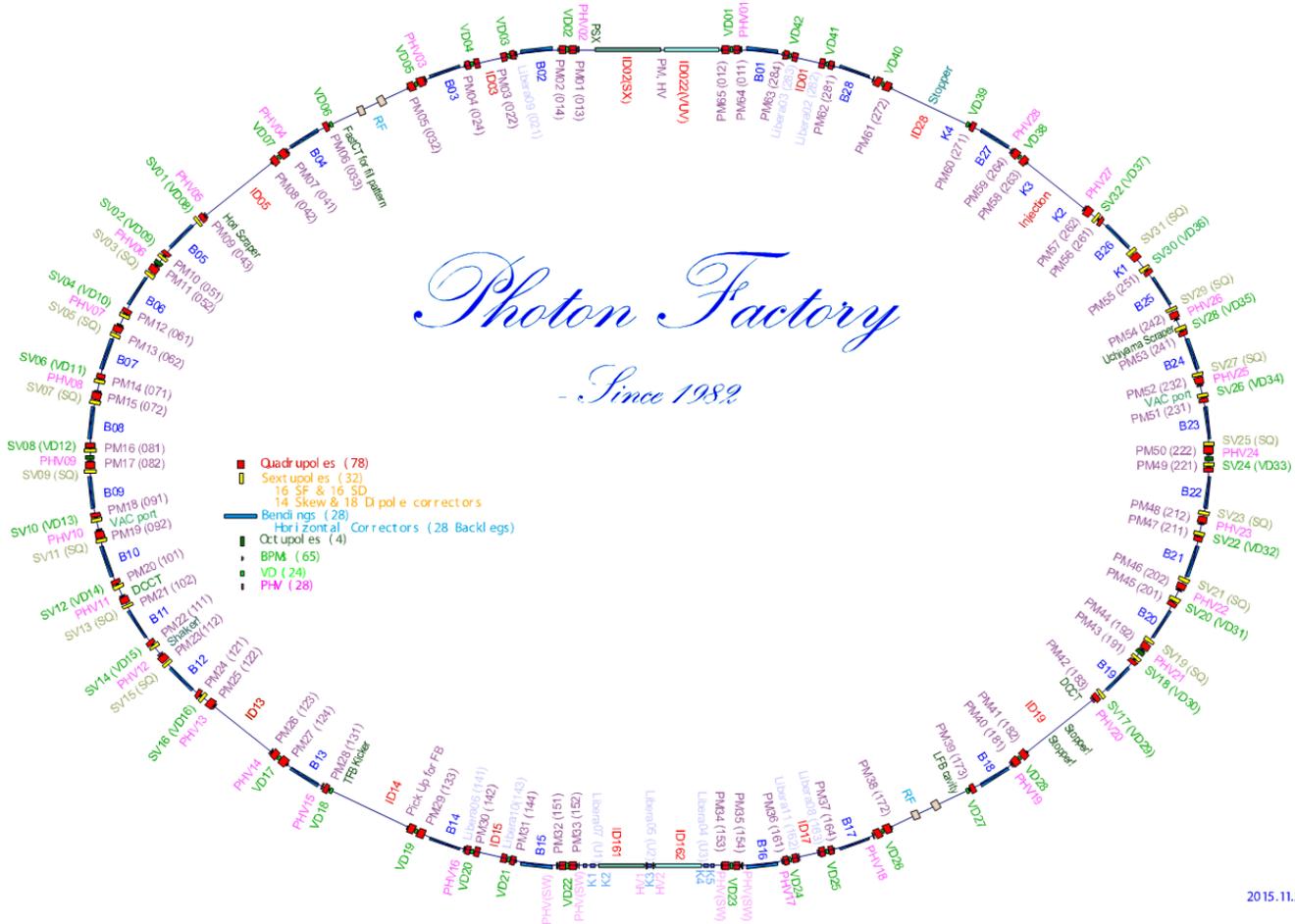


Photon Factory ビーム位置検出器データの可視化とクラスタリングによる異常検出の試み (広島商船卒研4名)



日本加速器学会年会 (PASJ2022)
WEPO29: 大山博史他「加速器分野への機械学習の応用を通じた人材育成の試み」
TUPO51: 神尾彬他「cERLにおける機械学習によるビームオプティクスの自動調整」

Photon Factoryの加速器運転データ ベースへのアクセス



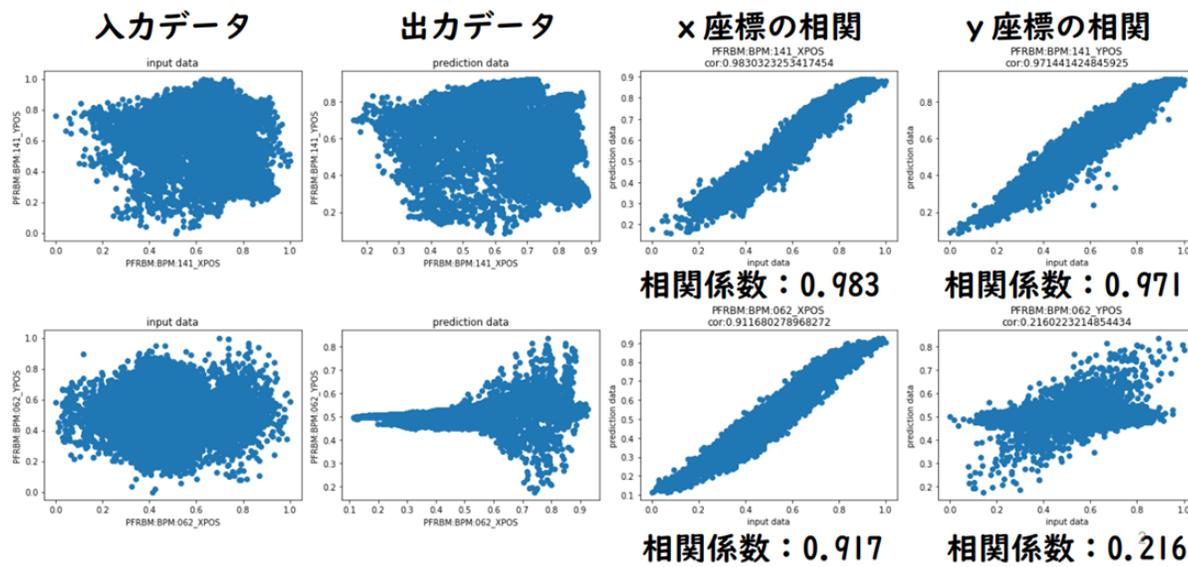
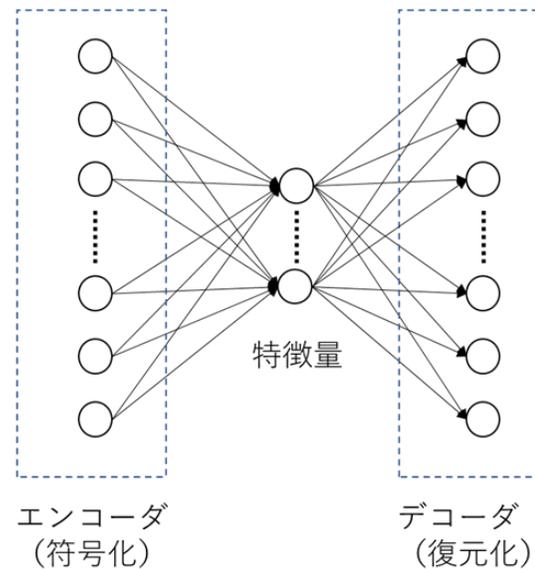
オートエンコーダ（自己符号化器・AE）による異常診断の可能性の検討（呉工業高専を中心とする取り組み）

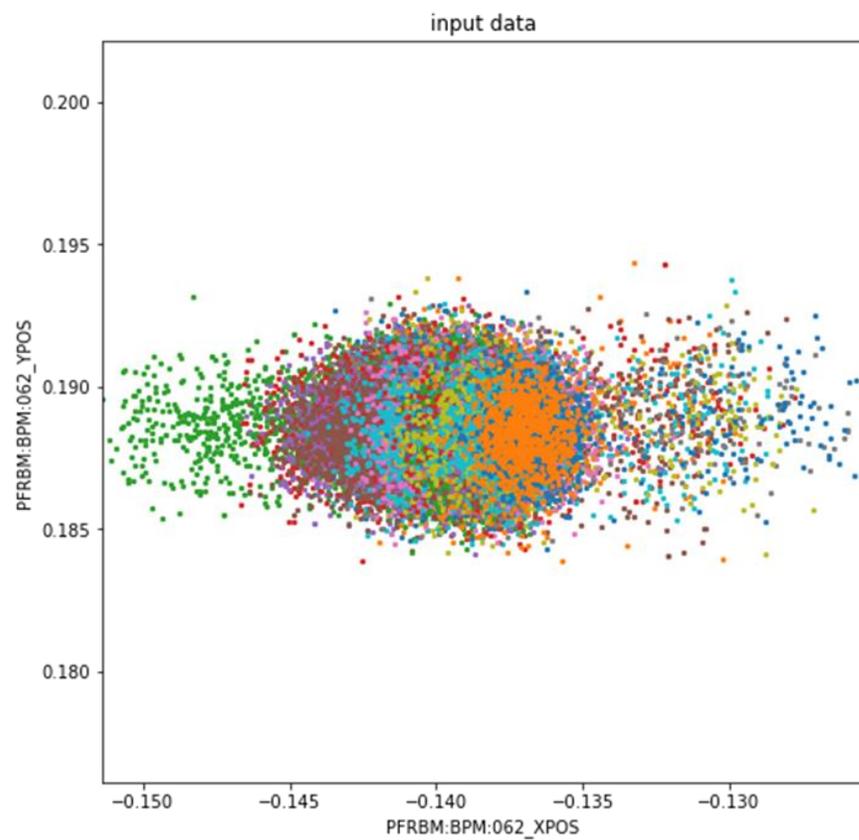
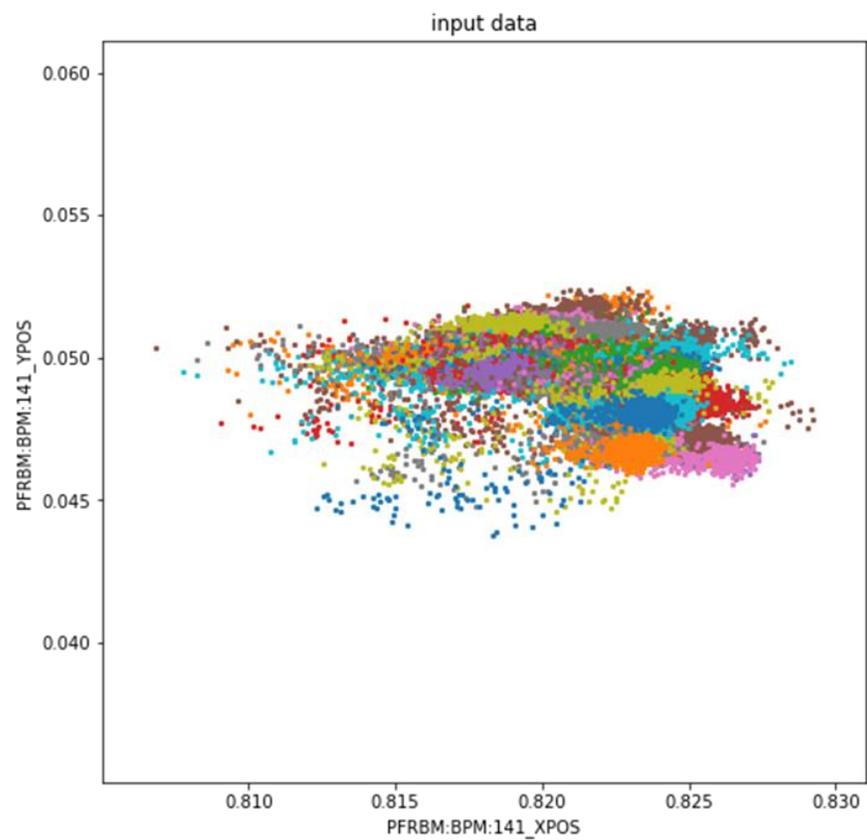
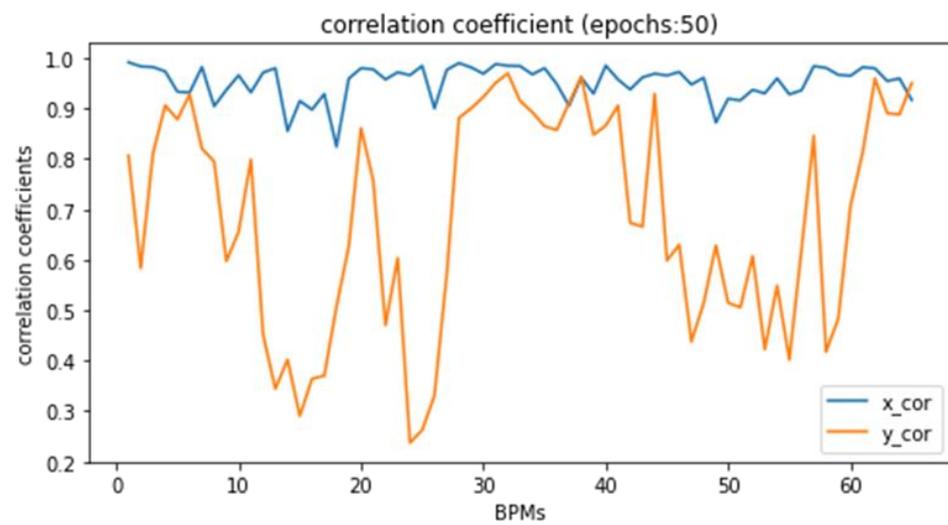
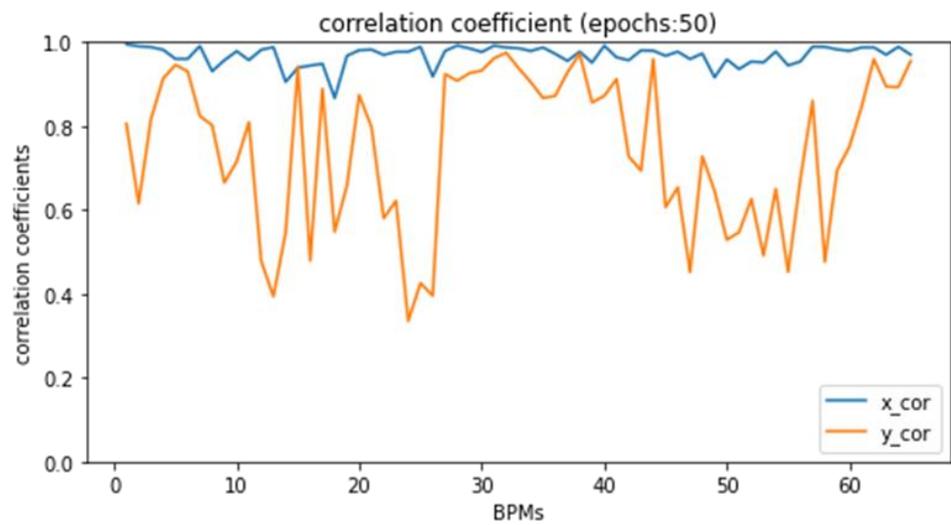
BPMデータの解析によりBPMの異常・不具合を発見できないだろうか？

澤田康輔 呉工業高専 卒業研究(2022)

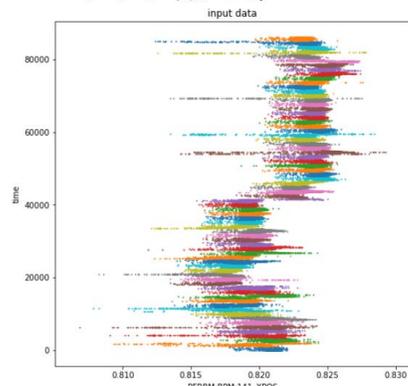
オートエンコーダ

- 教師なし学習モデル
- 入力を復元するように学習
 - 次元削減
- 故障診断などに活用
 - 通常と違う復元
 - 異常データ

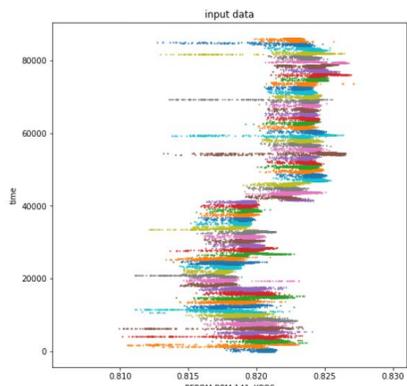




- x座標の散布図 (BPM_20210314, BPM : 141(相関係数 : 大), エポック数:50)



元データ

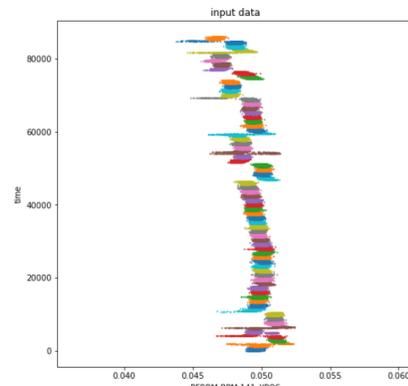


予測データ

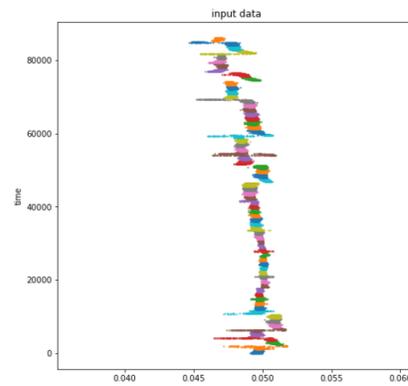
相関係数 :
0.985

71

- y座標の散布図 (BPM_20210314, BPM : 141(相関係数 : 大), エポック数:50)



元データ

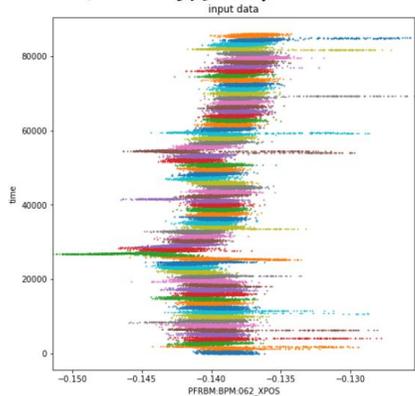


予測データ

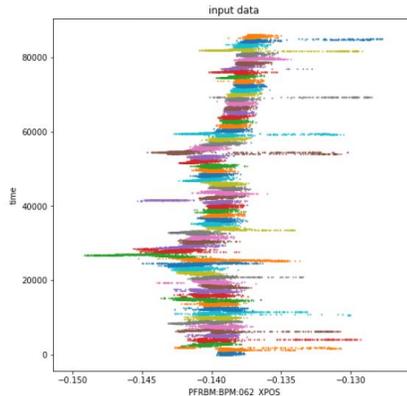
相関係数 :
0.970

72

- x座標の散布図 (BPM_20210314, BPM : 062(相関係数 : 小), エポック数:50)



元データ

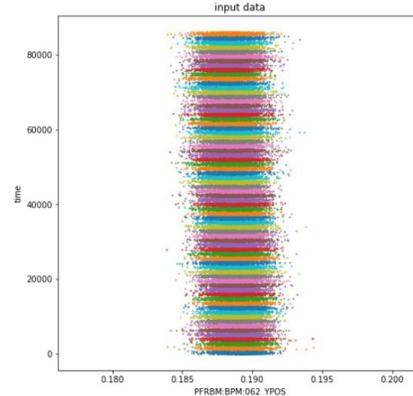


予測データ

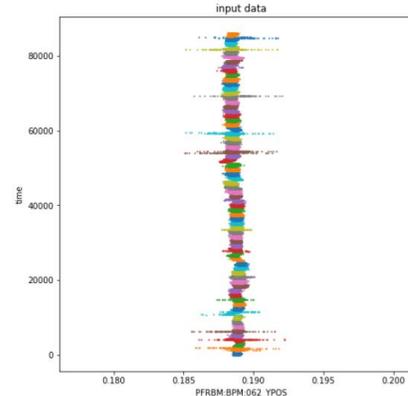
相関係数 :
0.915

73

- y座標の散布図 (BPM_20210314, BPM : 062(相関係数 : 小), エポック数:50)



元データ



予測データ

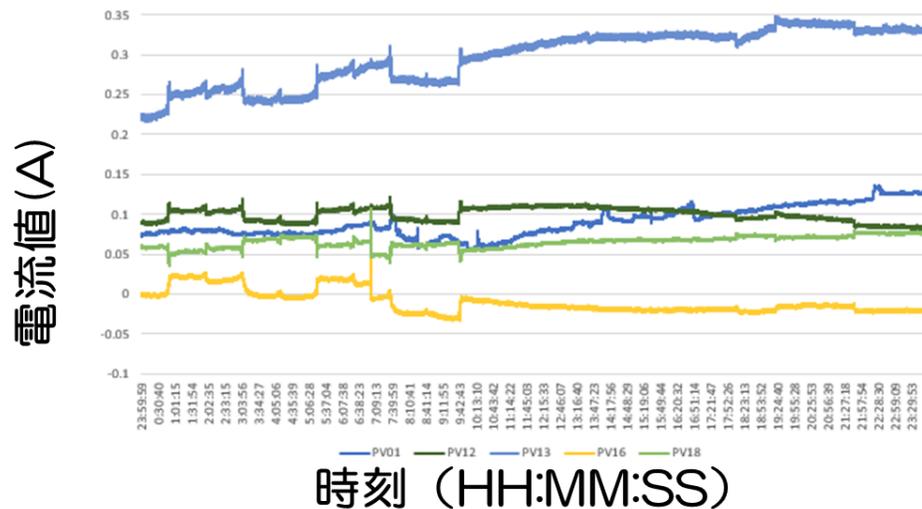
相関係数 :
0.290

74

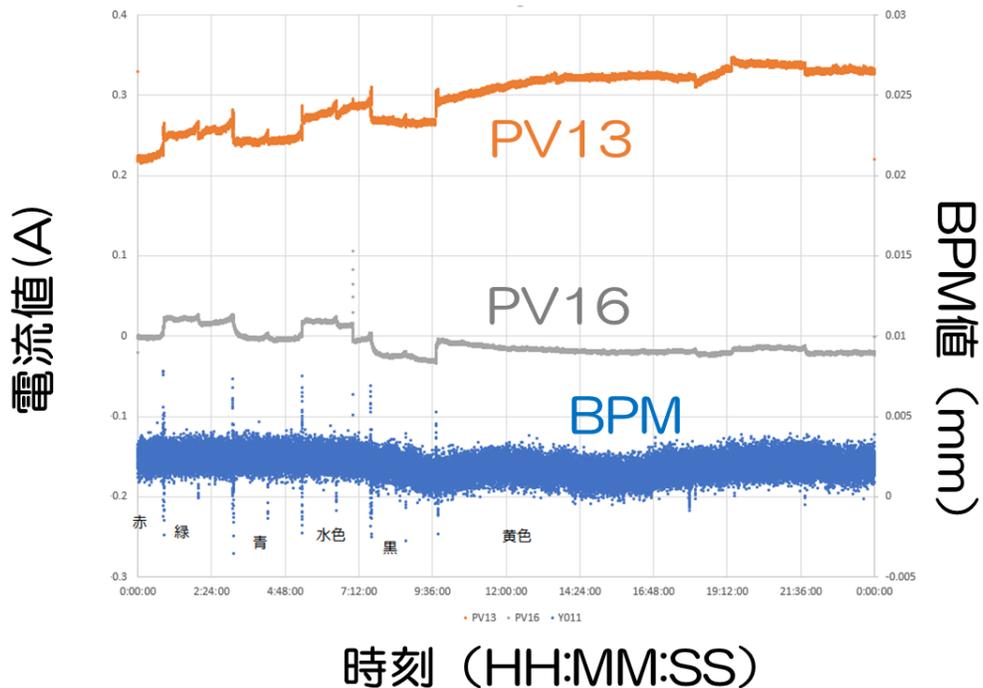
軌道補正用ステアリング電流値の可視化と軌道変動診断の可能性の検討（広島商船高専を中心とする取り組み）

軌道補正フィードバック用ステアリングの励磁電流変化を解析することで、ビーム軌道変化の異常を診断できないだろうか？

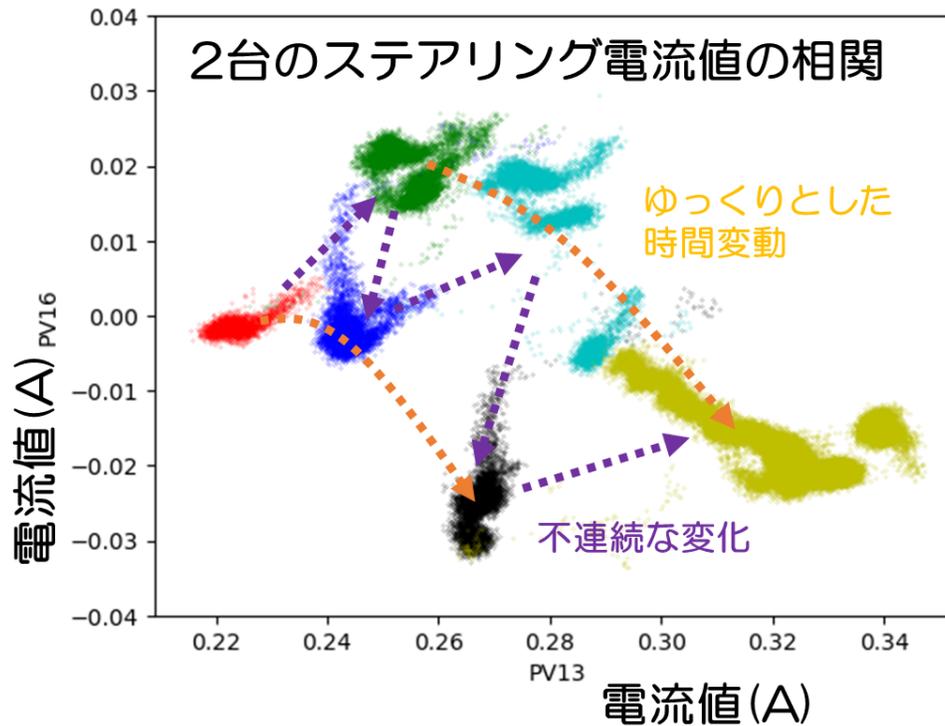
PFの軌道補正電磁石の一日の電流値変化の例



2台のステアリング電流値の相関



2台のステアリング電流値の相関



BPM, DCCTデータの前処理

呉高専2023年度の取り組み

- DCCT及びBPMのデータは常時取得
- これらのデータによる加速器の異常発見・診断の可能性？
 - 運転停止や加速器調整・マシンスタディ時のデータは異常診断から除く必要がある
 - BPMデータやビーム電流値のデータから運転状態を判断できるか？
- ⇒ データの前処理の試み

• BPMデータの前処理

- 基本的に1秒に一回、リング1周のBPMデータが保存されている
- データのない時期がある（加速器停止？データサーバー停止？）
- データの抜けの処理（同じ数値が続くと保存しない？）
- 異常値の処理
 - 全ビットが立っているような異常値有り（データの取り込みの問題？）

• DCCTデータの前処理

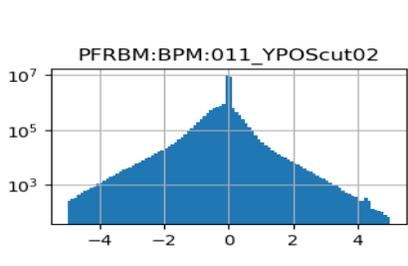
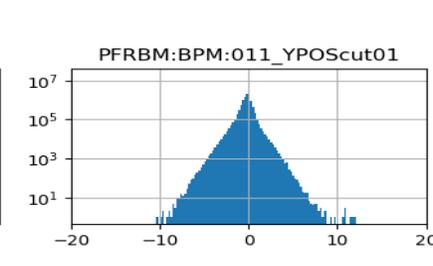
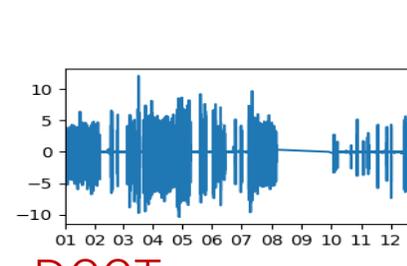
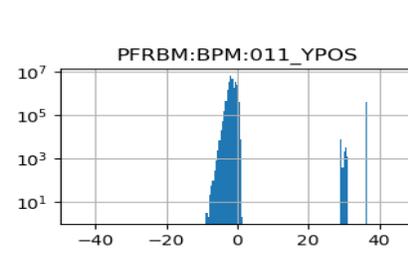
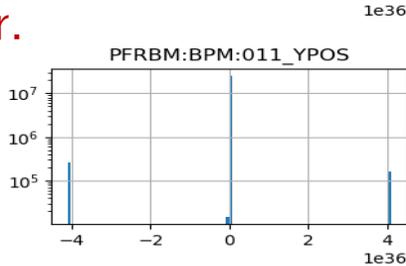
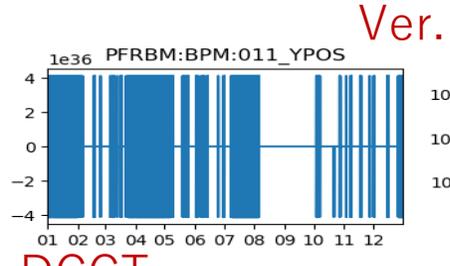
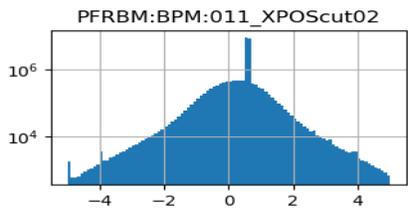
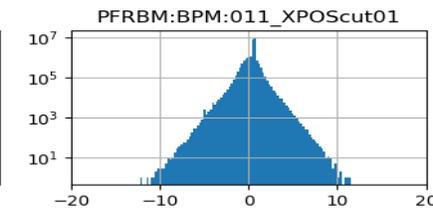
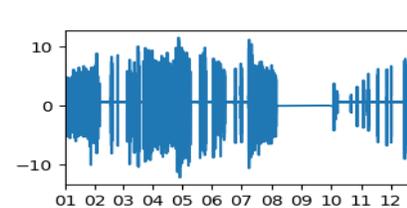
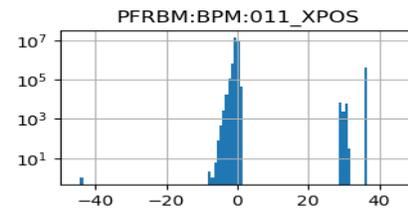
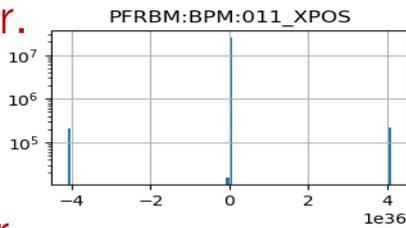
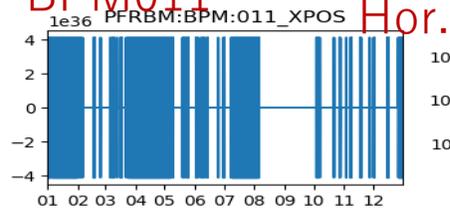
- 基本的に1秒に一回ビーム電流値が保存されている
- データの抜けの処理
- 異常値の処理

1週間程度のデータ処理では前処理の重要性は低いですが、1年分の処理などでは前処理が重要

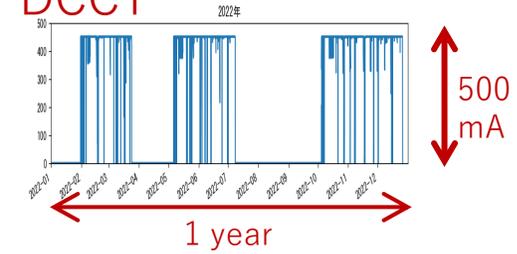
BPM出力値の分布

2022年データ

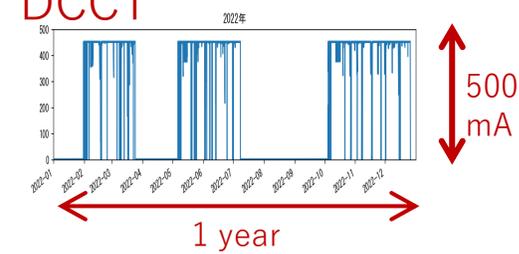
BPM011



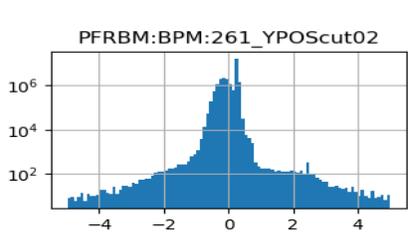
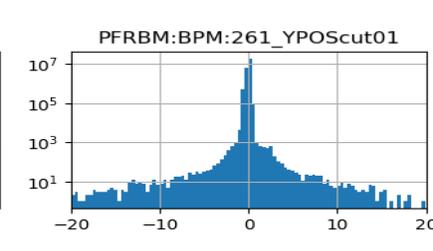
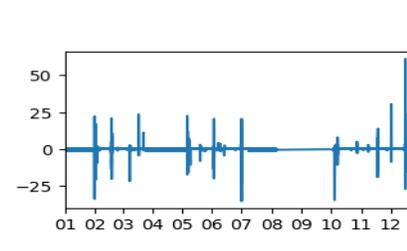
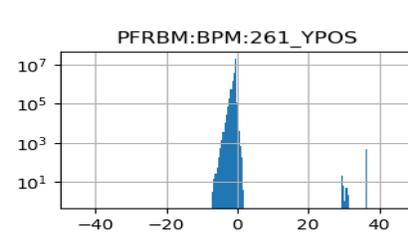
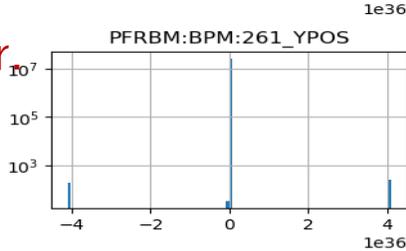
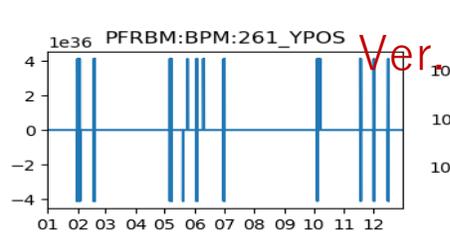
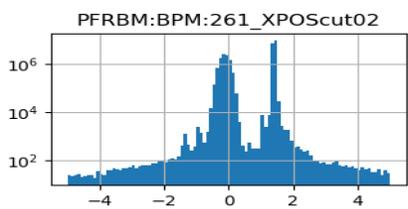
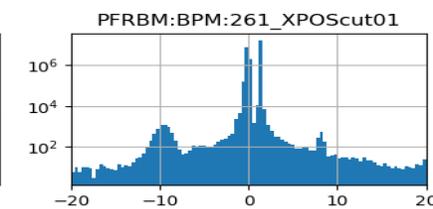
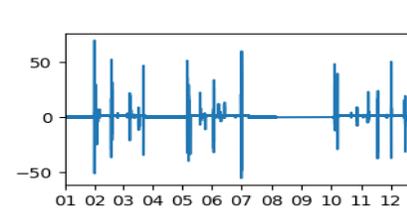
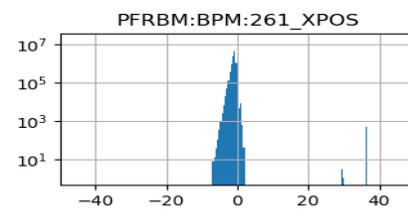
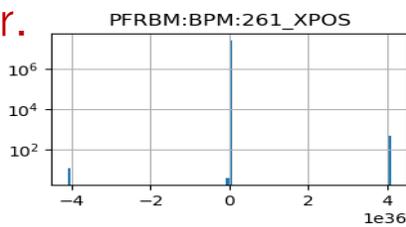
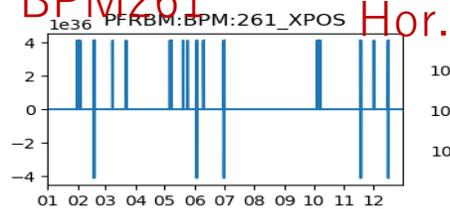
DCCT



DCCT

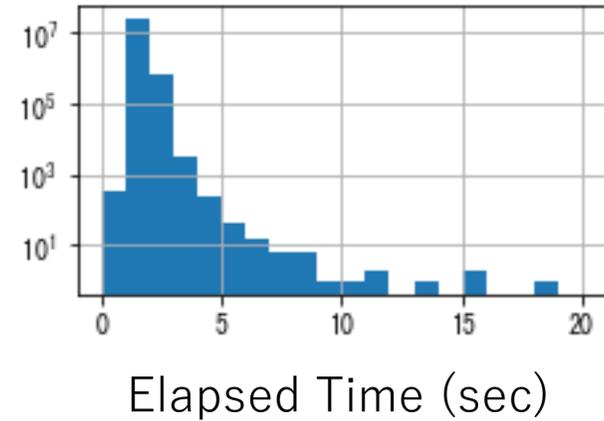
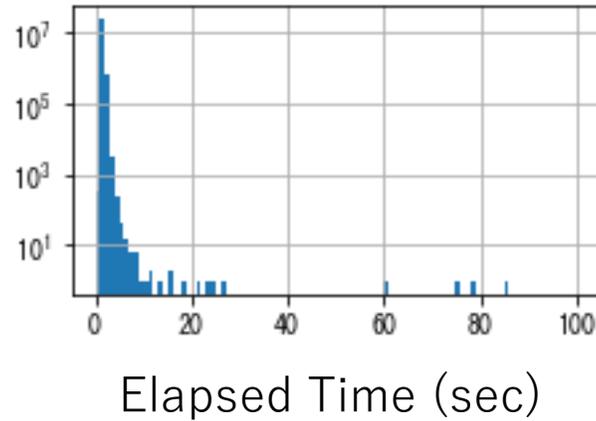
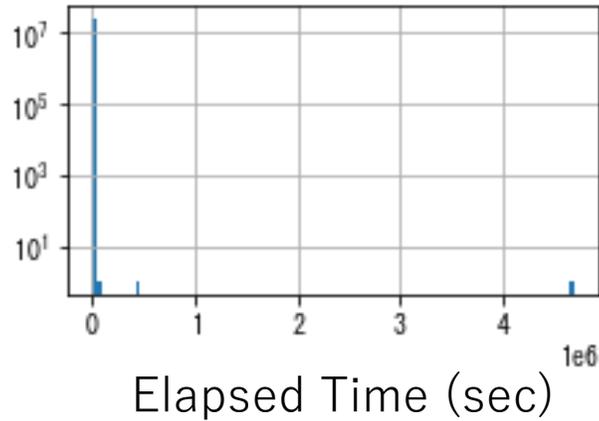


BPM261

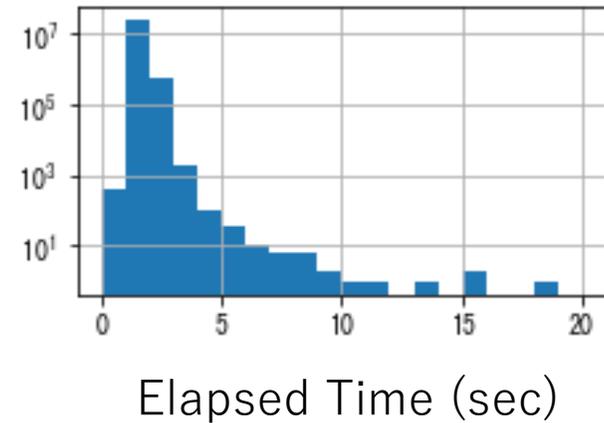
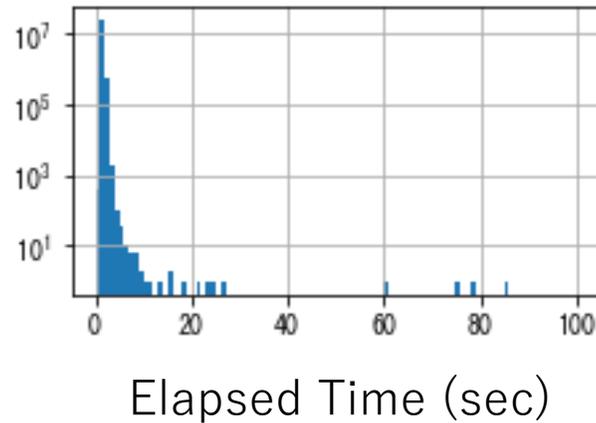
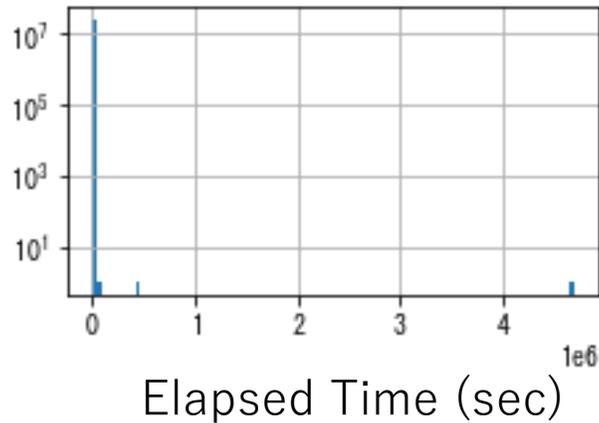


BPMデータの欠落時間の分布

BPM011

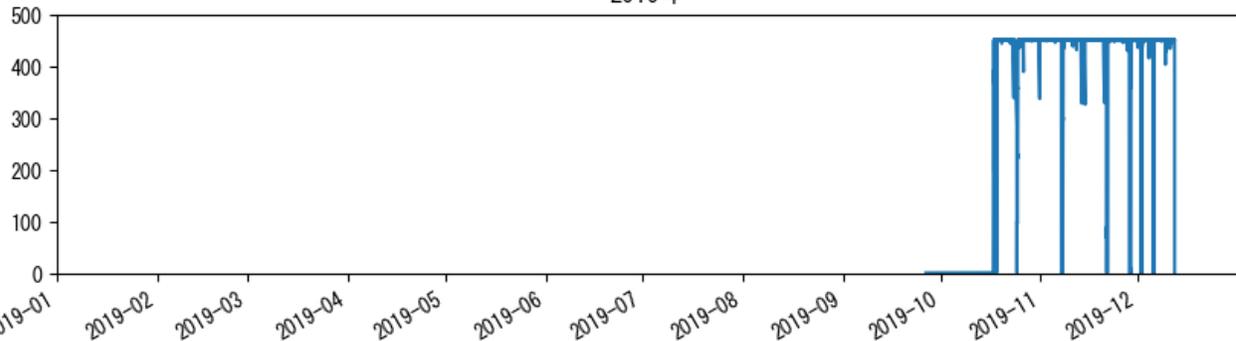


BPM261

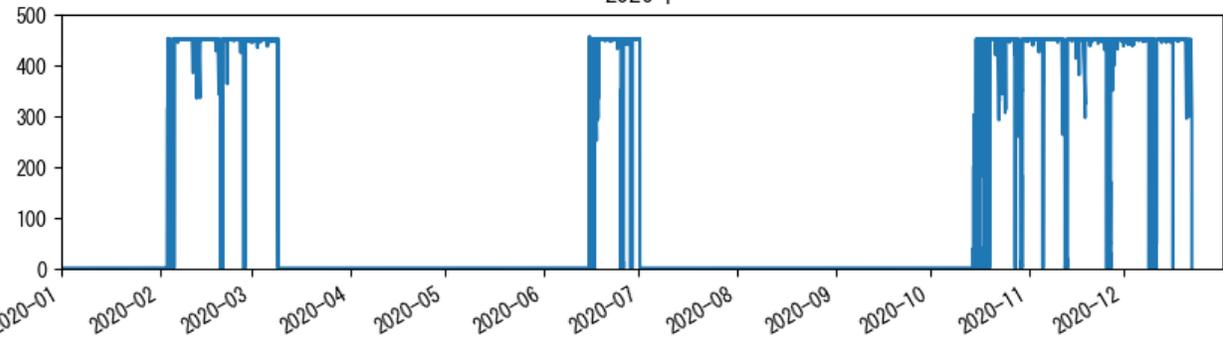


DCCT Data of KEK-PF (2019-2023)

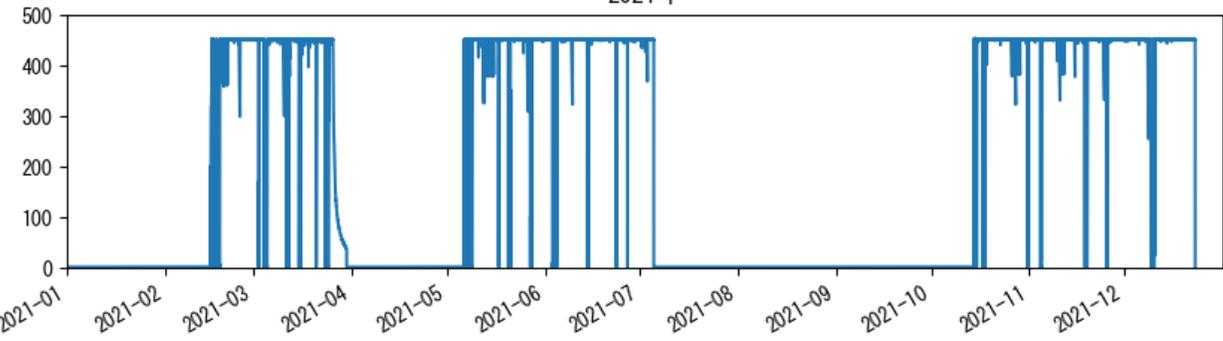
2019年



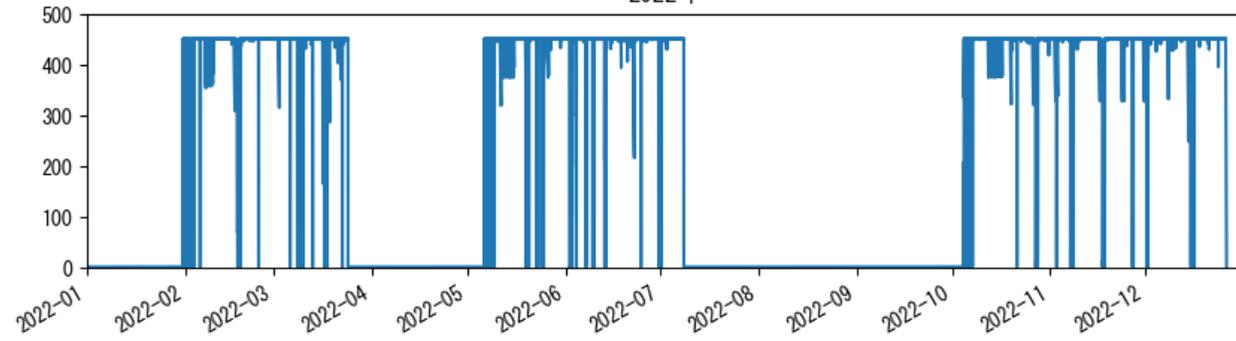
2020年



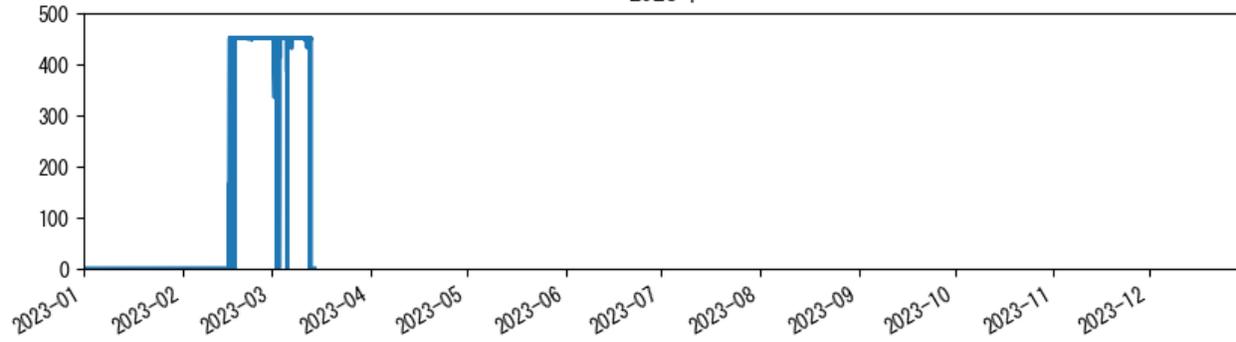
2021年



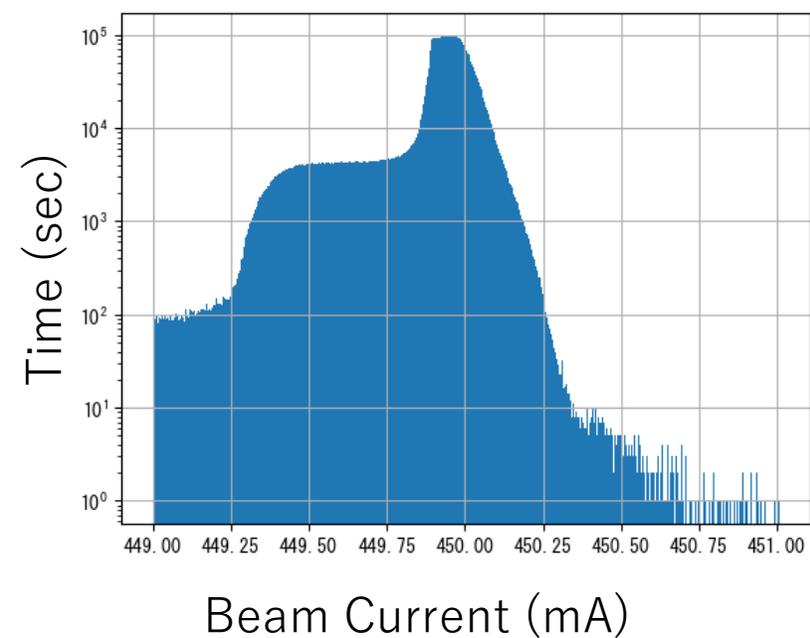
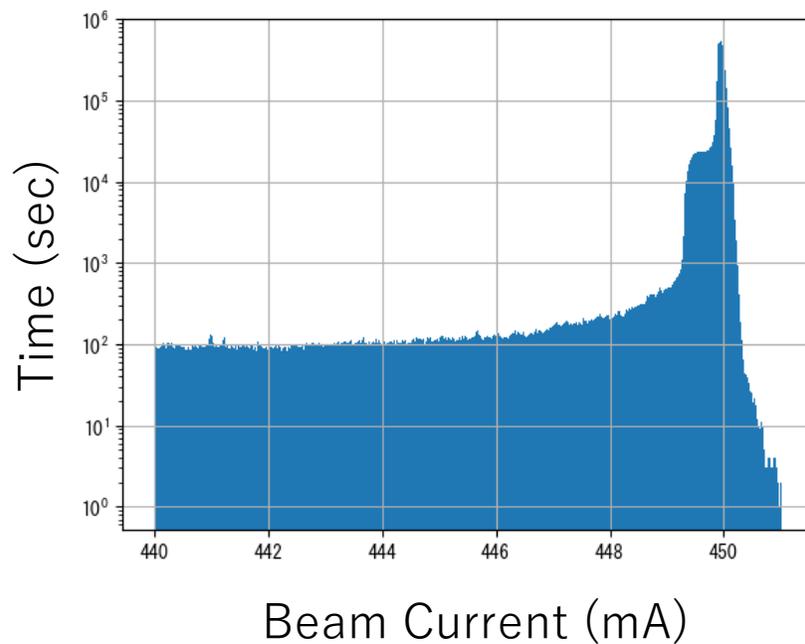
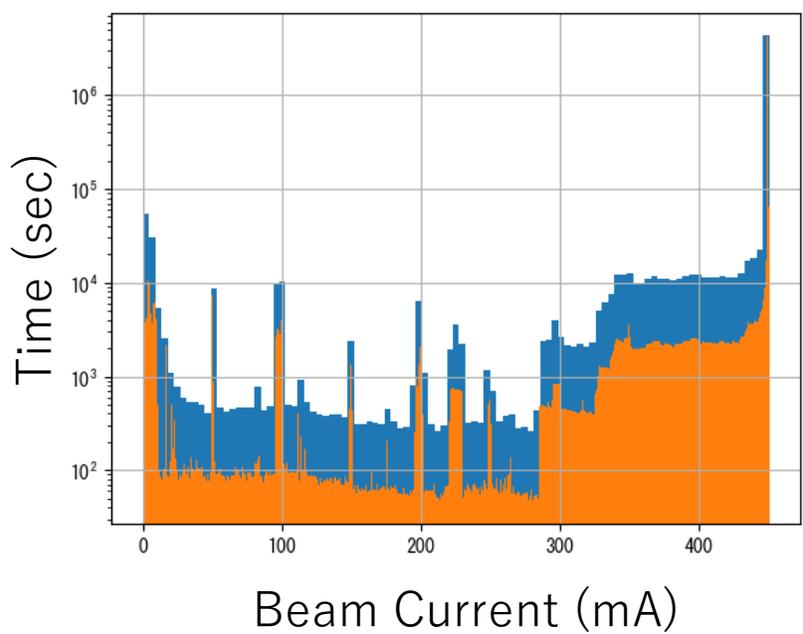
2022年



2023年

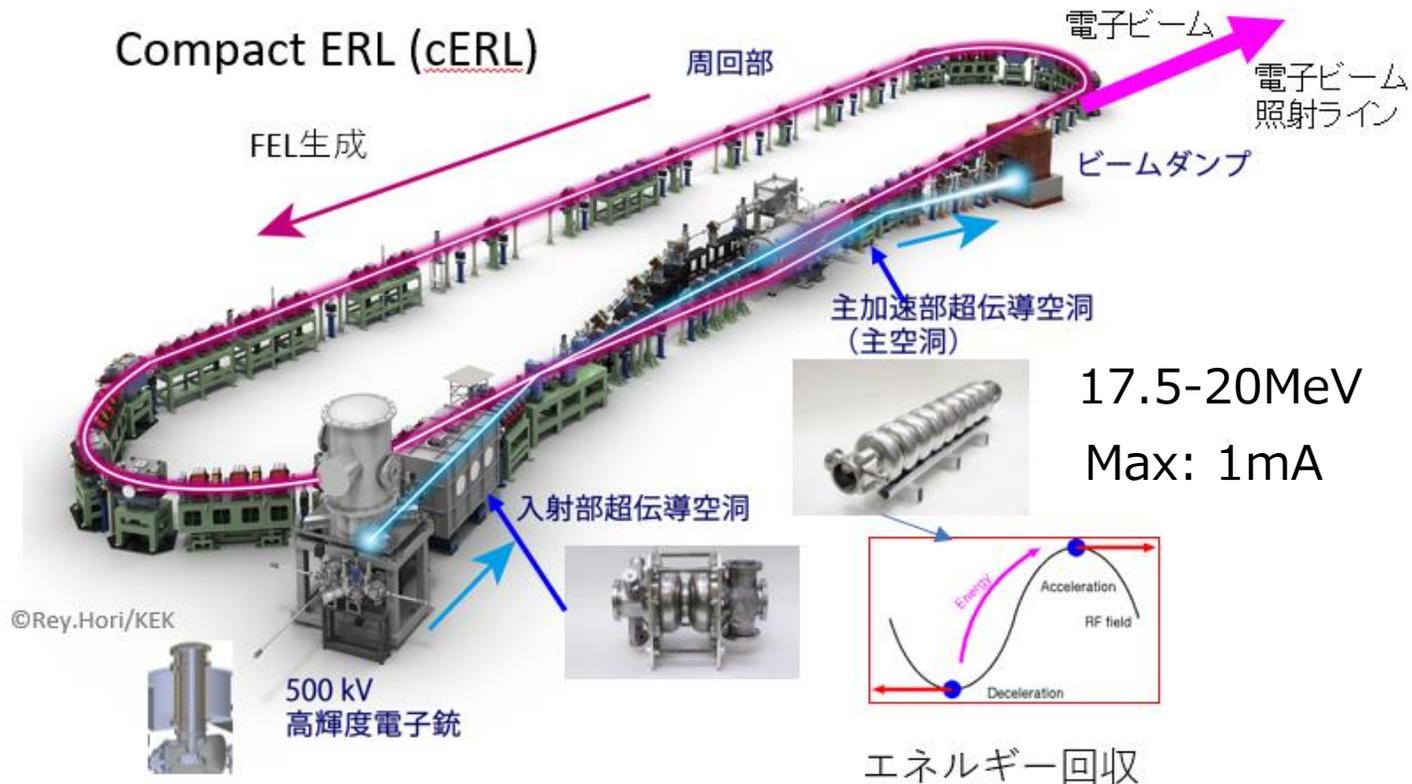


ビーム電流の分布



cERLにおけるビームオプティクス調整へのベイズ最適化応用

神尾彬（広島大） 修士論文(2023)



cERL運転調整の難しさ

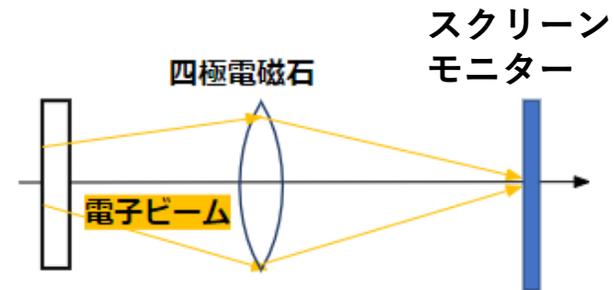
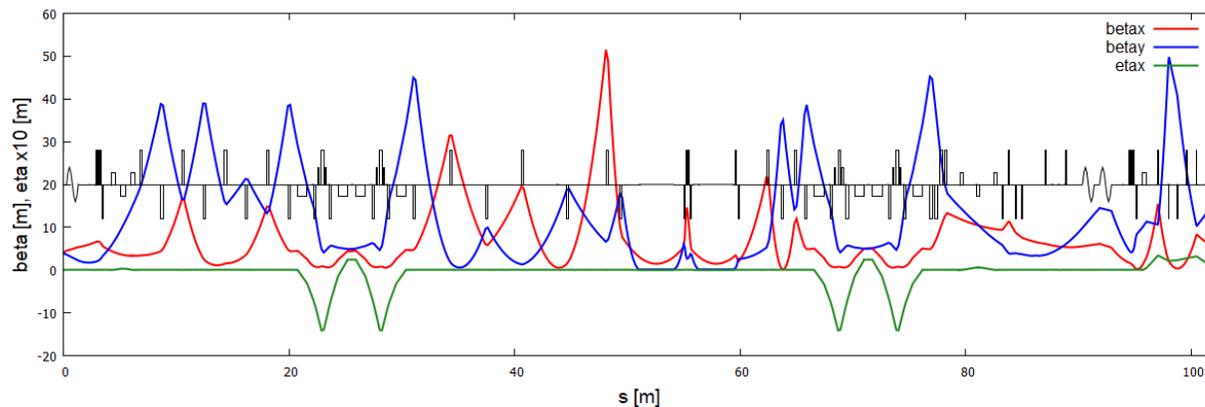
- 試験加速器であり運転時間が限られている
- 運転調整中の大強度ビームによる漏洩放射線増大や機器損傷を避けるため、事前に低電流運転で慎重にビーム調整を行う必要がある
- 電子ビームの利用法に合わせてビーム強度、オプティクスなどを大幅に変更する必要がある



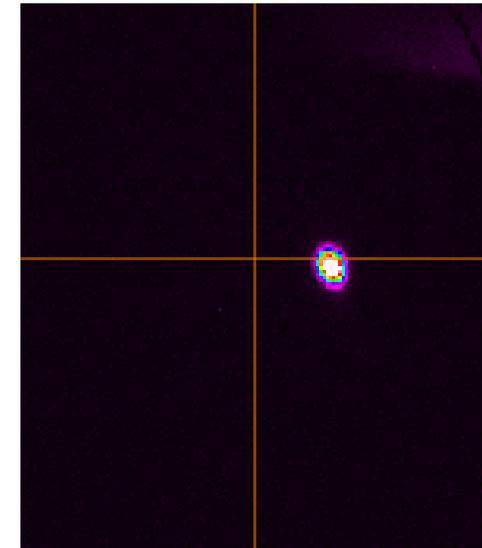
運転調整の効率化が重要課題の一つ

cERLにおけるビームオプティクス調整へのベイズ最適化応用

cERLのビームオプティクス



スクリーンモニターによって撮影されたビーム形状



- リングの各所でビームサイズを測って設計値からのずれを計測
- 四極磁石の強さを変えてビームサイズが設計値通りになるように調整

- ◆ 多数の四極磁石 + 多数のスクリーンモニター
- ◆ 漏洩放射線の抑制
- ◆ ビーム照射による機器損傷の回避



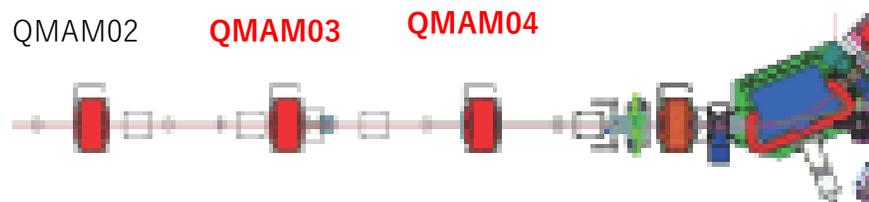
- ◆ 熟練が必要
- ◆ 低電流での慎重な調整が必要
- ◆ しかし、運転時間もマンパワーも限られている！



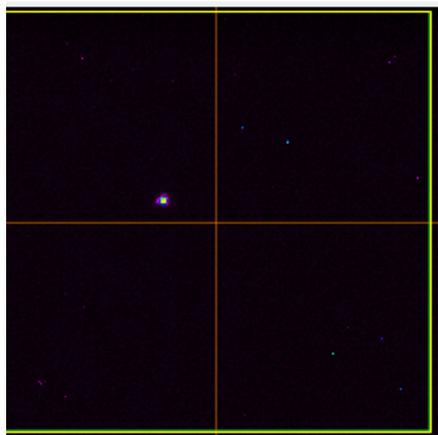
機械学習による調整の効率化、自動化

QM2台スクリーン1台によるベイズ最適化の試行

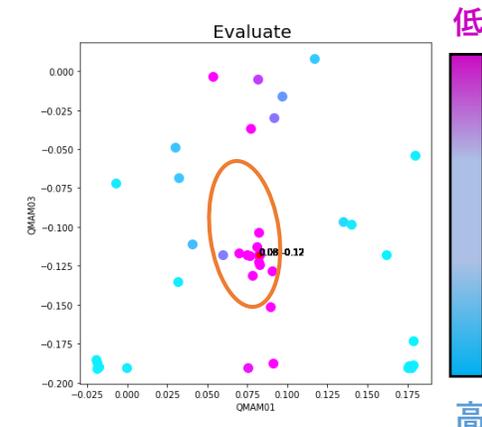
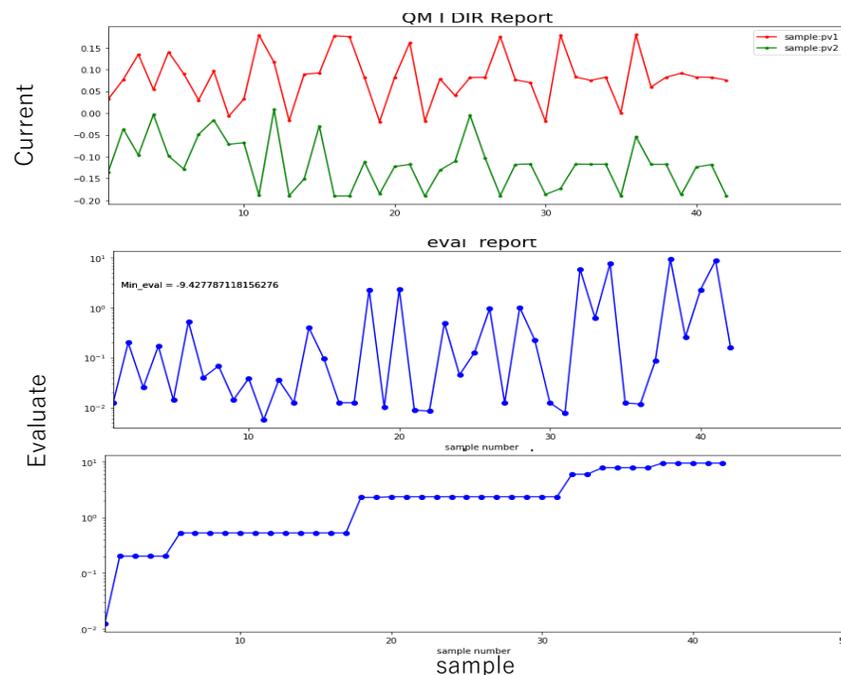
電流値を設計値付近で±1Aの範囲から最適値を探索させた。
40回の測定で目標ビームサイズに到達させることを目指した。 **実際のビームを使って最適化を行った結果**



四極電磁石QMAM01~04を入力として、その下流にあるスクリーンモニターでの電子ビーム画像から評価関数を計算してこれにベイズ最適化を適応する。



目標 (3,3) →調整後(2.98, 2.86)

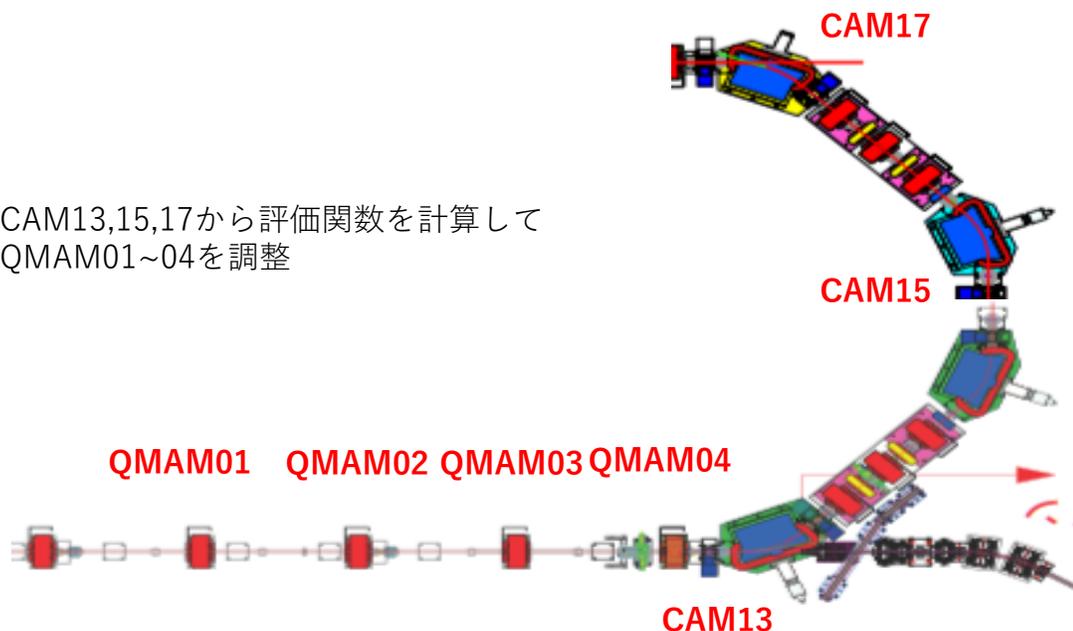


40点程度でかなりの精度で調整でき、電流値の記録や評価関数の分布から評価関数のよかった点を重点的に探す様子が見られ、ベイズ最適化として正しい挙動が確認できた。

QM4台でのアーク部のスクリーン3台の調整

CAM13, CAM15, CAM17 のすべてのスクリーンモニタで三台のスクリーンモニタのビームから評価関数を算出してベイズ最適化を行う。Sample数は二台の時同様40点で行った。

CAM13,15,17から評価関数を計算して
QMAM01~04を調整



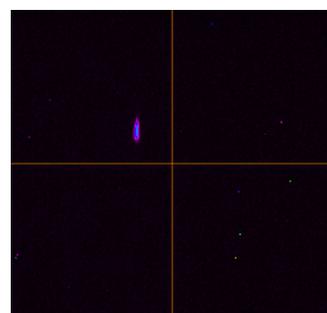
上のように制約を与えてうまく収束できるようになる？

評価関数

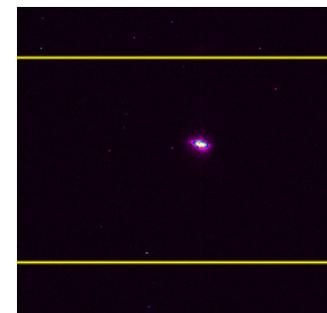
$$E = |\sigma_x - target\sigma_x| + |\sigma_y - target\sigma_y| + \dots$$

実際にビームを使って調整した結果

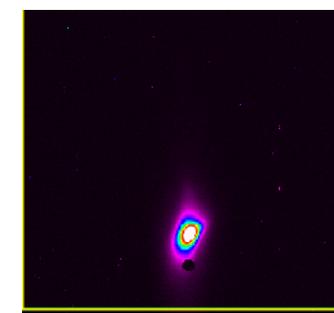
ベイズ最適化による調整後のスクリーン画像とビームサイズ目標値と調整後のビームサイズ



CAM13pixel
目標(1.8,9.0)
結果(1.7,8.91)



CAM15pixel
目標(10,6)
結果(11.35,5.51)



CAM17pixel
目標(19.2,22)
結果(20.02, 22.31)

sample数40でもそれなりの精度で収束が確認できた。

評価関数を計算する際、毎回五枚程度の画像を使い、それを平均している。スクリーンモニタは約0.3秒に一枚の頻度で画像が更新されるので一回の測定だけでも6,7秒以上使う。さらにQMの電流値を変える毎、同じヒステリシスループで調整のため一度-5A→5A→目標の電流値に持っていく必要があるため、これでも時間を取られる。

更なる精度向上、効率化に向けて考えられたのが、ヒステリシスの解決である。

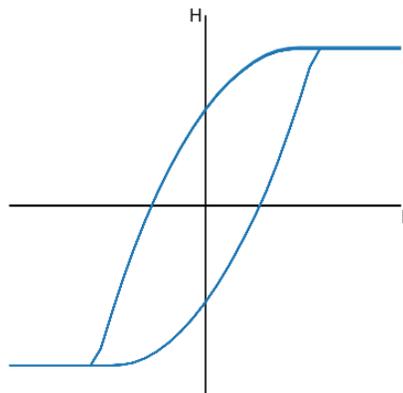
加速器運転調整におけるヒステリシスの影響

神尾彬（広島大）修士論文(2023)

ヒステリシス；

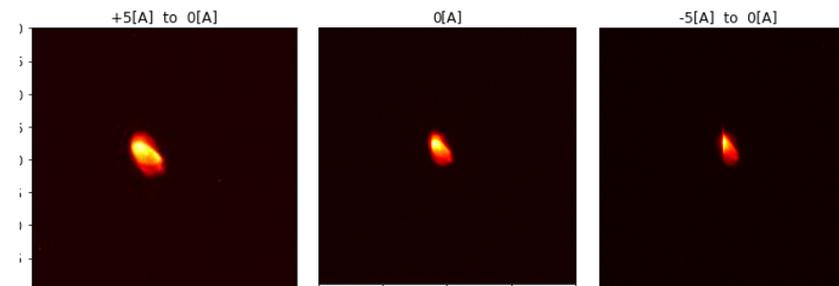
ある系の状態が現在加わっている力等だけでなく、過去の状態にも依存して変化する現象。

特に、粒子加速器の磁氣的、機械的、材料的要素におけるヒステリシス効果は、加速器施設の性能最適化を困難にしている。



電流と磁場の応答は線形ではなく、独自のループ（ヒステリシスループ）を描く。cERLオプティクス調整では同じループに乗せるため、5A→-5A→目標の電流値の流れを毎回行う必要があった。

非効率

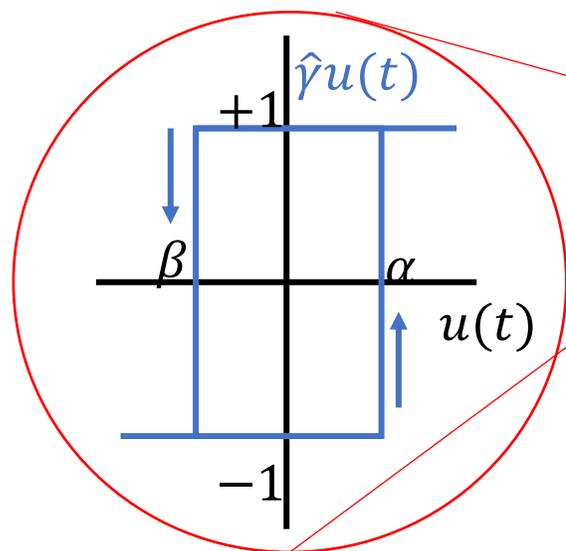


5→0A（左）、0A（中央）、-5→0A（右）の異なる非ステリシスループでのビーム画像。ヒステリシスの影響のために、同じ電流値に対してもビームの形が異なっている。

ヒステリシスをモデル化し機械学習により最適化することで、ヒステリシスを含む加速器システムの効率化・高精度化はできないだろうか？

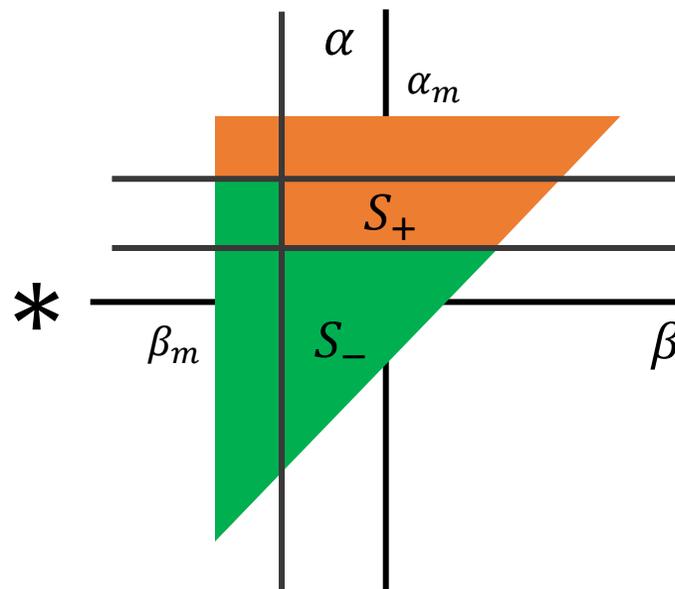
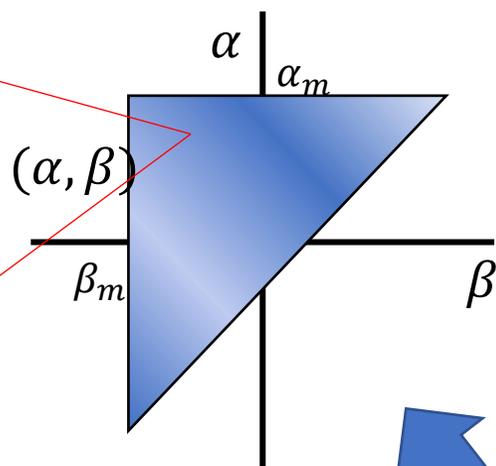
プライザツハモデルとは

プライザツハモデルでは強磁性体は飽和特性の異なる多数の磁気双極子の集合体（ヒステロン）として表現されると考える。さまざまな飽和特性 (α, β) を持つヒステロンがある密度分布関数 $\mu(\alpha, \beta)$ で分布している集合によって磁界と磁束密度の応答が決定される。



ヒステロンの密度分布

$\hat{\gamma}_{\alpha, \beta} u(t)$; $u = \alpha$ で +1、 $u = \beta$ で -1 に跳躍



ヒステロンの磁化の分布

ヒステロン密度分布 $u(\alpha, \beta)$ を実験から同定

ヒステリシス含む電流磁場応答を予測できる

プライザツハモデルによる磁場計算

$$f(t) = \hat{\Gamma} u(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha, \beta} u(t) d\alpha d\beta$$

微分可能なノンパラメトリックプライザツハモデル

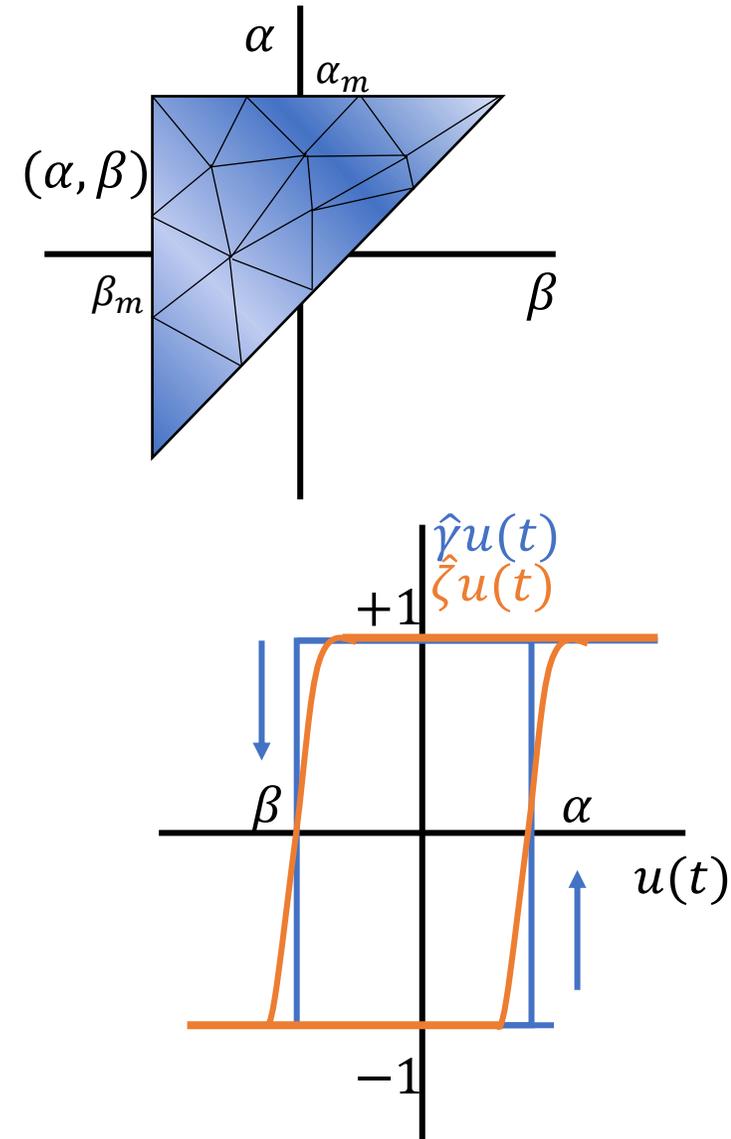
ノンパラメトリックなプライザツハモデル；

ヒステロン密度分布関数 $u(\alpha, \beta)$ をメッシュ状に離散化したモデル。

- 数理最適化による解析的関数への近似より複雑なパターンに適応しやすい。
- 多大な計算コスト

ヒステロン演算子を微分可能な γ に置き換え、微分可能なプライザツハモデルを作り、勾配法と組み合わせることでノンパラメトリックモデルを拡張[1]

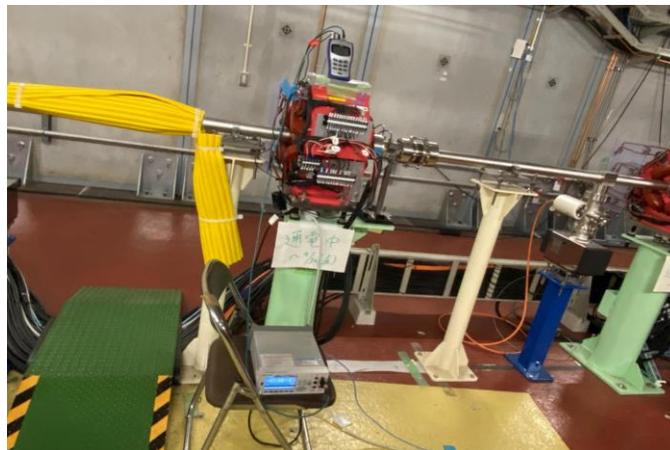
$$\hat{\zeta}u_m(t) = \begin{cases} \min\left(\hat{\zeta}u_{m-1} + \tanh\left(\frac{u_{m-1} - \beta}{|T|}\right)1\right) & u_m > u_{m-1} \\ \max\left(\hat{\zeta}u_{m-1} - \tanh\left(-\frac{u_{m-1} - \alpha}{|T|}\right) - 1\right) & u_m \leq u_{m-1} \end{cases}$$



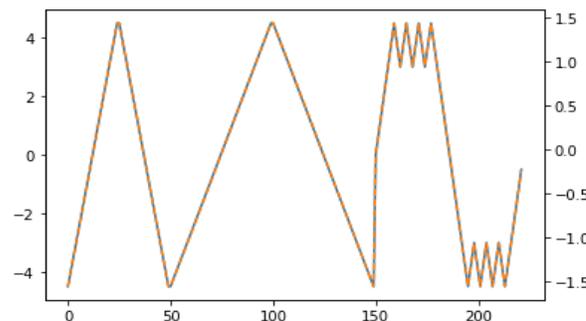
cERL電磁石のヒステリシスへのプライザツハモデルの応用

実験手法

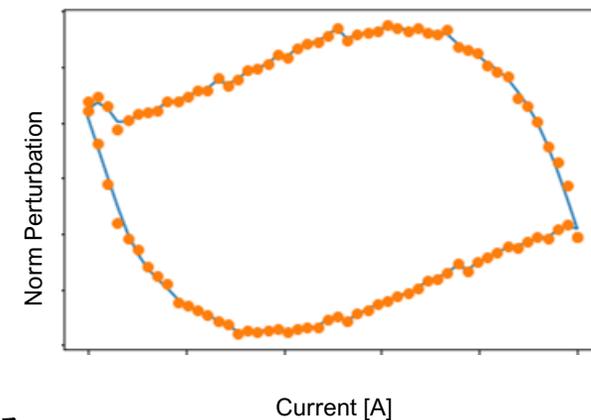
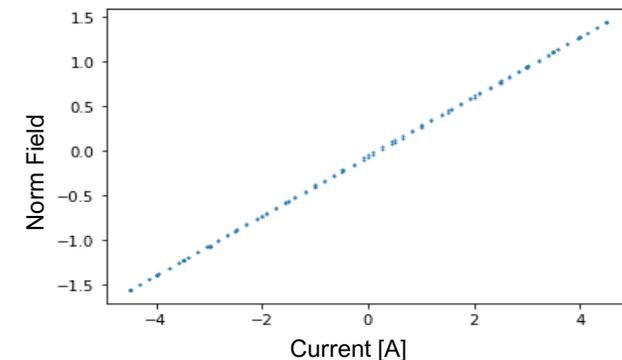
- ▶ 先行研究[1]内で、githubにて公表されている (https://github.com/roussel-ryan/diff_hysteresis) を参考に、cERL電磁石でもうまく働くのかを調査した。
- ▶ cERL内部に設置されている四極電磁石の間にガウスメーターを固定し磁場を測定する。四極電磁石への励磁電流と磁場の応答を計測する。
- ▶ 測定した電流磁場応答のデータを訓練用データとテスト用データに分け、訓練用データでヒステロン密度分布を学習させ、その学習したヒステロン密度分布を用いてテスト用データの励磁電流から磁場を推定させ、実際の磁場と比較してどの程度予測できるかを調査する。



実験装置



電流をいろんなパターンで流して、磁場の応答を記録する。



磁場はフィットした直線からの誤差からヒステリシス特性を強調

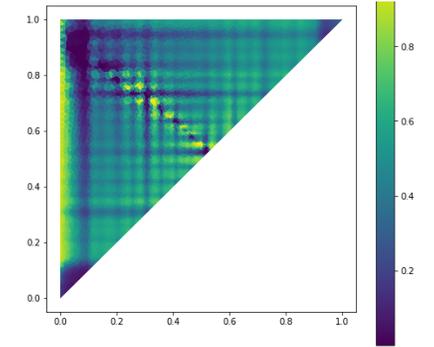
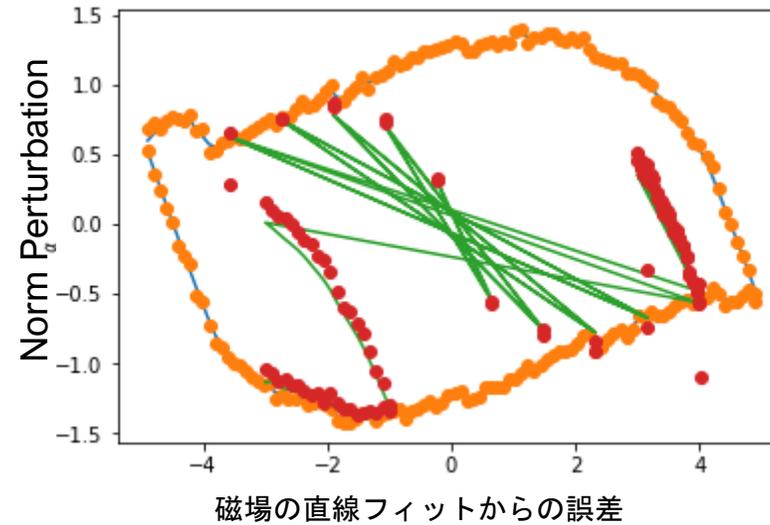
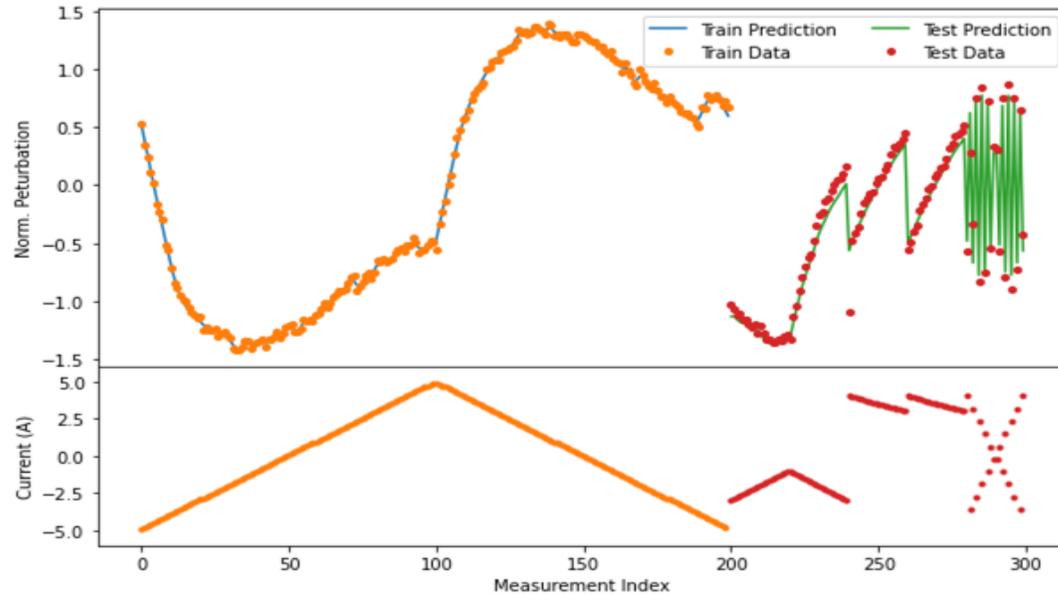
cERL電磁石のヒステリシスへのプライザッハモデルの応用

測定した電流磁場で学習させる。

訓練用（橙）とテスト用（赤）に分け、電流（下）からヒステリシス誤差（上）の予測をさせた。

緑線：予想

赤点：実測



学習したヒステロン密度分布

| | RMS誤差[%] | 先行研究の結果[%] |
|-------|----------|------------|
| train | 0.88 | 0.015 |
| test | 3.36 | 0.051 |

予測精度としては、グラフを見ると十分そうであるが、先行研究の結果と比較すると、学習誤差が大きい。これは、cERLの励磁電流は最大でも5Aと先行研究の100A以上と比較すると低く、学習時に磁石が飽和するまで流していないために絶対値に対する精度が低くなっている可能性がある。

この誤差が電子ビームに有意な誤差を与えるかを考える必要がある。

まとめ

- KEK-PFの運転データアーカイブにアクセスし長期間のデータを解析できる環境が整った。
- DCCT、BPM、軌道補正用ステアリング電流値などのデータによる加速器運転状態の判定や異常の有無の診断の可能性を模索している。
- オートエンコーダー法やクラスタリングなどを試みている。
- データの可視化を予備知識なしにいろいろやってみると意外に面白い。
- cERLのビームオプティクス調整でベイズ最適化は効果的であった。
- プライザッハモデルによるヒステリシスを含む電磁石制御の可能性が見えてきた。