

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

リ ヨハン

*李 耀漢(京大理), 外山 毅, 中村 剛(KEK/J-PARC),
中家 剛, 木河 達也(京大理), 小関 忠(KEK/J-PARC)

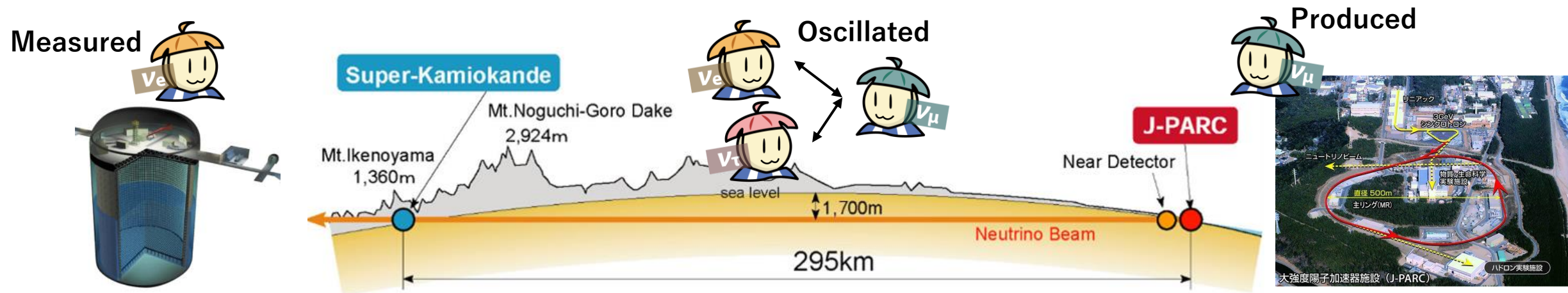


目次

1. 16電極ビームモニター開発の背景
2. 16電極ビームモニターの測定原理
3. 新しいアルゴリズムの紹介
4. 解析結果
5. まとめ

実験背景 - T2K実験

- ニュートリノ (ν_e, ν_μ, ν_τ) 振動実験
 - ニュートリノ振動: 飛行中にニュートリノの種類が変わる現象
- CP対称性の破れの発見及び振動パラメータの精密測定を目指す
- J-PARC Main Ring(MR)のニュートリノビームラインで生成されたニュートリノビームを、295 km先のスーパーカミオカンデで測定 (*Tokai To Kamioka*)
- 系統誤差を減らしより測定な精度を行うためには統計量の増量が必須 (T2K-II)
 - J-PARC MRのビーム強度の増強
 - ニュートリノ検出器のアップグレード



実験背景 - ビーム強度増強

- J-PARC MR速い取り出しのビーム強度のアップグレード

	Present	Plan
Rep. Cycle	2.48 s	1.16 s
Protons Per Pulse	2.6×10^{14}	3.2×10^{14}
Beam Power	~ 500 kW	1.3 MW

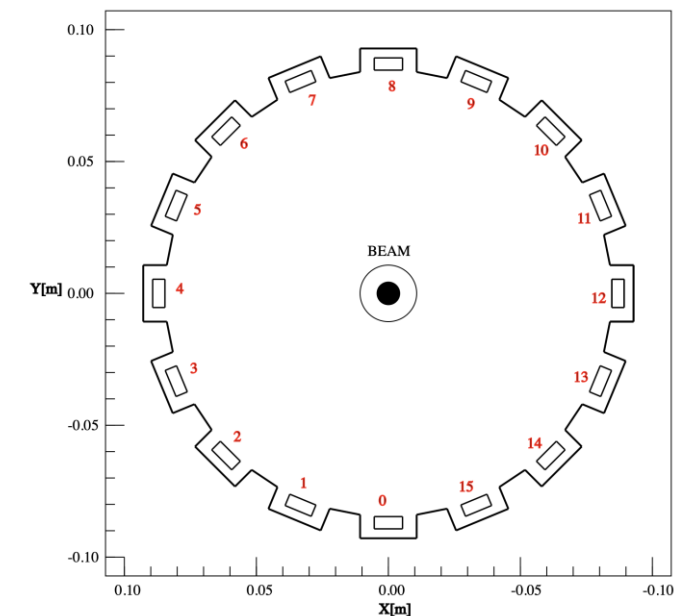
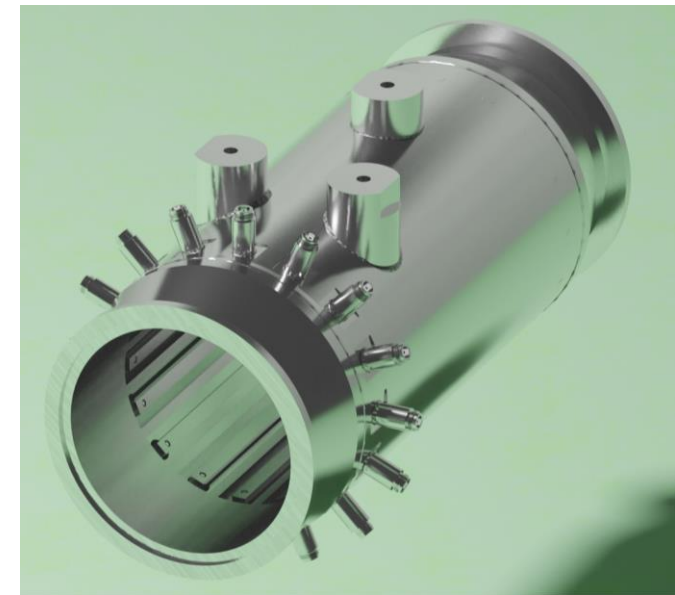
- 強度に依存するビーム不安定性によりビームロスが増大
 - Twissパラメータのミスマッチによる横方向のビームサイズの振動の抑制
 - ビームサイズを測定する必要がある
- 他のモニターが大強度のビーム測定が困難な状況
- 非破壊型でビームサイズ測定をするための16電極ビームモニターが設置

Beam Monitor	Quantity
Flying Wire Profile Monitor (FWM)	2
Ionization Profile Monitor (IPM)	3

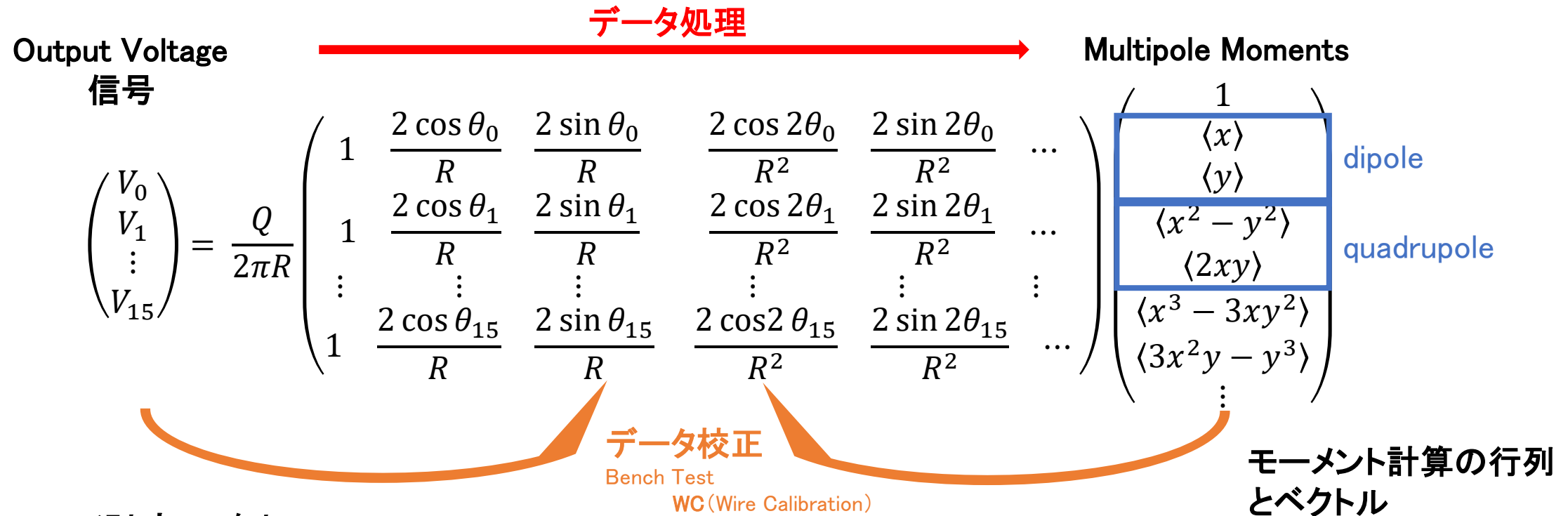
16電極ビームモニター

モニター概要

モニター名	16電極ビームモニター 16PU(position Pick Up)		
モニター種類	ストリップライン型		
測定項目	横方向のビームプロファイル		
インストール台数	2台 (#13、#15)		
電極数	16個		
材質	SUS316L (高耐食ステンレス鋼)		
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



16電極ビームモニターの測定原理



• エミッタンス測定の実例

$$\begin{aligned} \langle x^2 - y^2 \rangle &= \sigma_x^2 - \sigma_y^2 + \langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2 \\ &= \epsilon_x \beta_x - \epsilon_y \beta_y + \langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2 \end{aligned}$$

エミッタンスの計算例。2地点のモーメントの測定からエミッタンス ϵ_x, ϵ_y が求まる。(ただし、 $\frac{\beta_{x,1}}{\beta_{x,2}} \neq \frac{\beta_{y,1}}{\beta_{y,2}}$)

ミスマッチ状態のビームの解析には使うのが難しい！

アルゴリズム開発背景

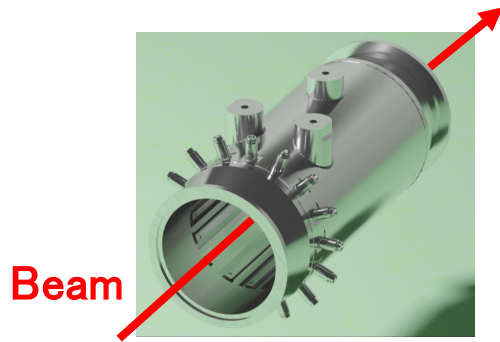
- 16電極ビームモニターを使ったビームサイズ測定の意味
 - 1次元の多重極モーメント情報から2次元電荷分布の情報を推定する(逆問題解析と呼ぶ)
 - 不適切問題: 解の一意性、解の安定性

$$Q \begin{pmatrix} 1 \\ \langle x \rangle \\ \langle y \rangle \\ \langle x^2 - y^2 \rangle \\ \vdots \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{推定}} \begin{pmatrix} q_{0,0} & q_{0,1} & \cdots & q_{0,n-2} & q_{0,n-1} \\ q_{1,0} & \vdots & \ddots & \vdots & q_{1,n-1} \\ \vdots & \ddots & \rho(x,y) & \ddots & \vdots \\ q_{m-2,0} & \vdots & \ddots & \vdots & q_{m-2,n-1} \\ q_{m-1,0} & q_{m-1,1} & \cdots & q_{m-1,n-2} & q_{m-1,n-1} \end{pmatrix}$$

- 逆問題解析によく用いられる遺伝的アルゴリズム
 - 個体ベースの最適化アルゴリズム
 - 自然選択による生物の進化を模したプロセス
 - 世代交代により解が徐々に最大値若しくは最小値に近づく
- 16電極ビームモニターから算出された多重極モーメントを同じく持つ2次元の電荷分布を遺伝的アルゴリズムを用いて推定する

アルゴリズム開発背景

- Fitness Function (適合度関数): 最適解の探索のための評価関数



$$M_{measurement} = Q \begin{pmatrix} 1 \\ \langle x \rangle \\ \langle y \rangle \\ \langle x^2 - y^2 \rangle \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} q_{0,0} & q_{0,1} & \cdots & q_{0,n-2} & q_{0,n-1} \\ q_{1,0} & \vdots & \ddots & \vdots & q_{1,n-1} \\ \vdots & \ddots & \rho(x, y) & \ddots & \vdots \\ q_{m-2,0} & \vdots & \ddots & \vdots & q_{m-2,n-1} \\ q_{m-1,0} & q_{m-1,1} & \cdots & q_{m-1,n-2} & q_{m-1,n-1} \end{pmatrix} \longrightarrow M_{guess} = Q \begin{pmatrix} 1 \\ \langle x \rangle \\ \langle y \rangle \\ \langle x^2 - y^2 \rangle \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$$F_{fitness} = \sum_{i=0}^{15} w_i (M_{measurement,i} - M_{guess,i})^2$$

* モーメント同士の次数が異なるため、
適当な重み w_i をかける

アルゴリズム開発ロードマップ

Step 1

- ・ 定常状態のビームサイズ推定
- ・ 条件付き解析ができるプロトタイプアルゴリズム開発
- ・ 16電極ビームモニターの先行研究の解析結果と比較

現段階

Step 2

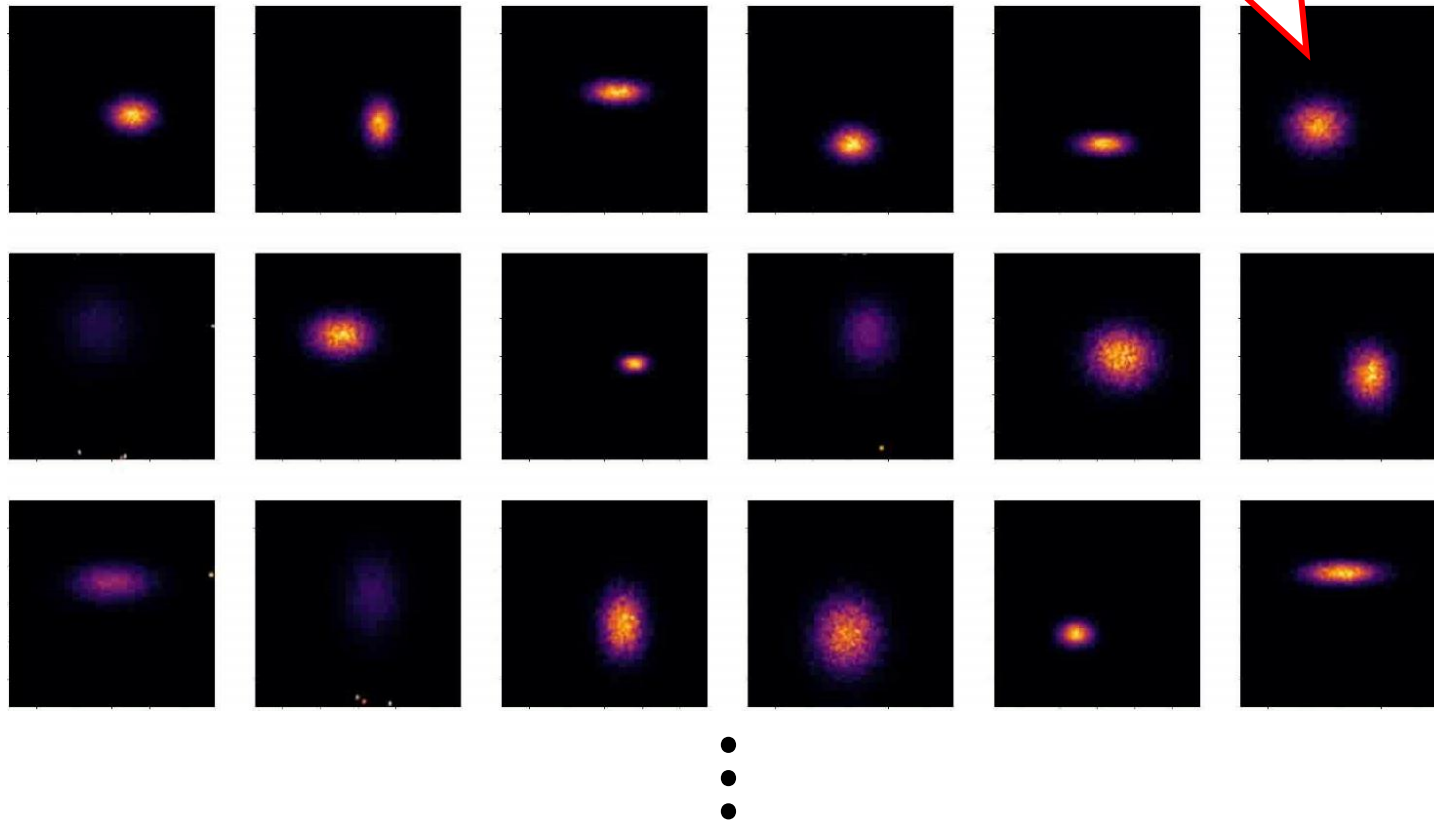
- ・ 非定常状態のビームサイズ推定
- ・ より一般的な状態のビームの解析ができるアルゴリズムに改良
- ・ 他のビームモニターとの比較等、アルゴリズムの評価方法の明確化

Step 3

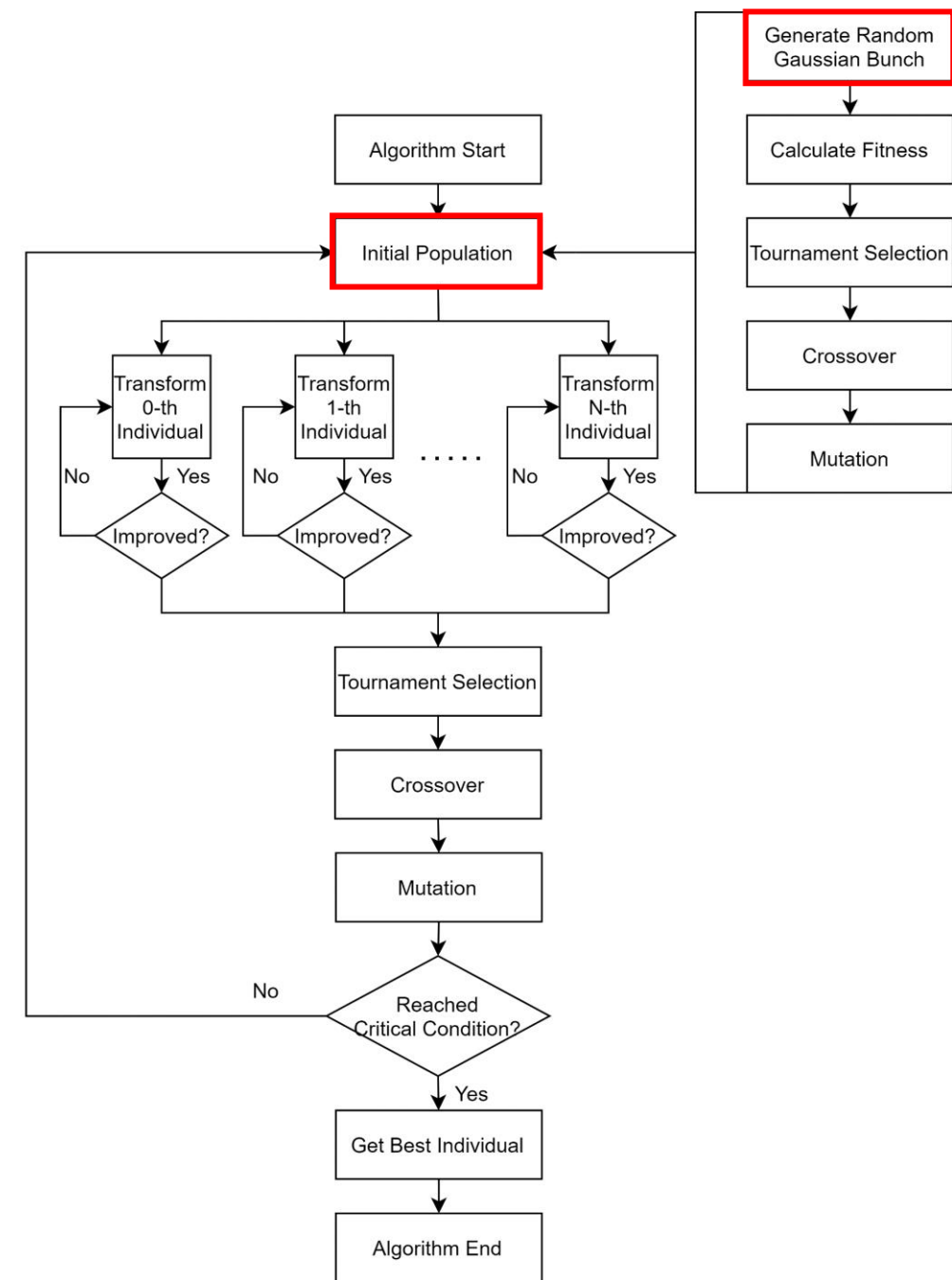
- ・ Twissパラメータミスマッチ状態のビームサイズ推定
- ・ ミスマッチ状態のビームサイズを測定しビームサイズ振動抑制に活用
- ・ アルゴリズムの最終目標

アルゴリズム設計

Initial Process: Generate Random Bunch
ランダムな2次元ビーム分布を生成する

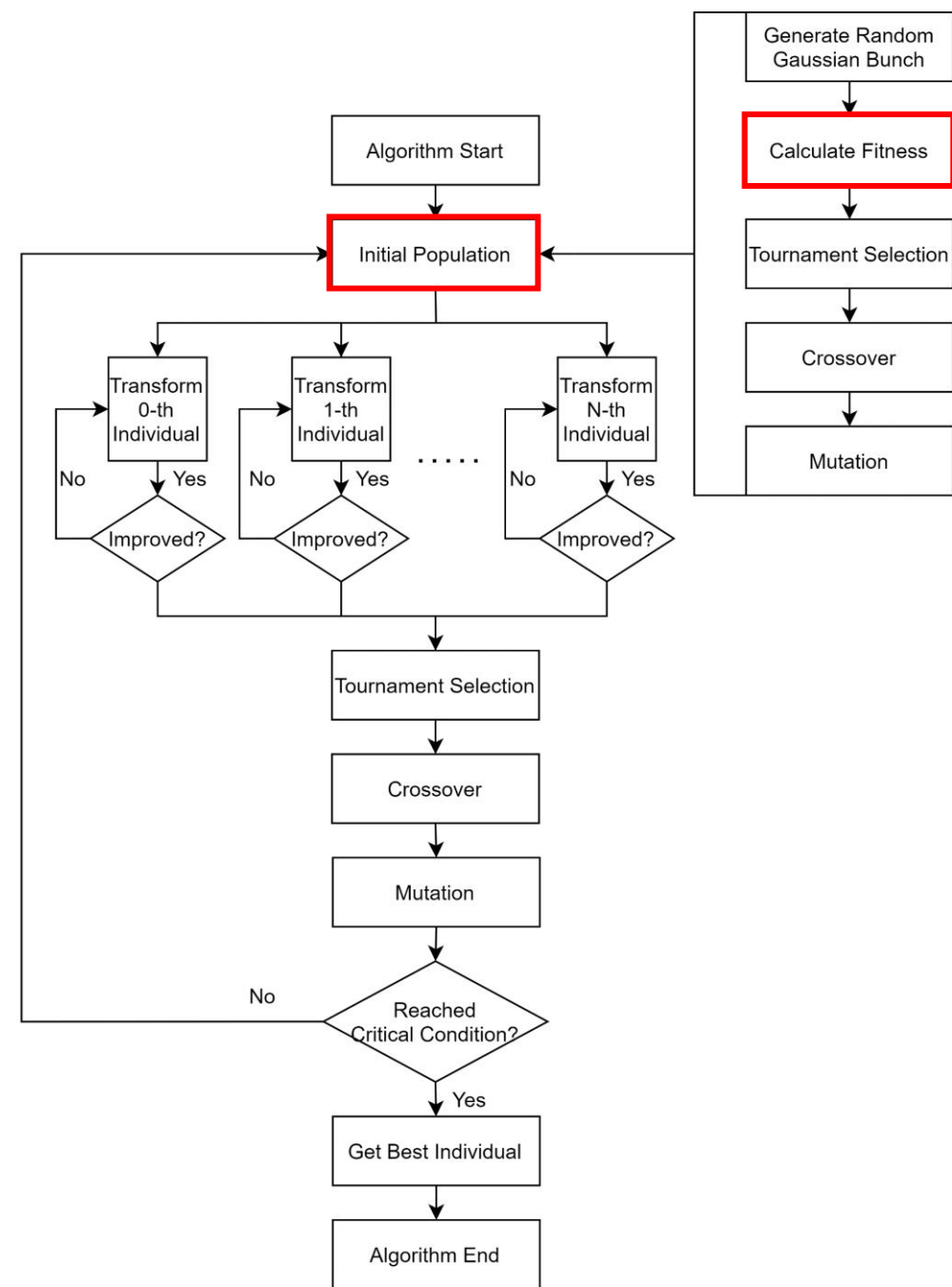
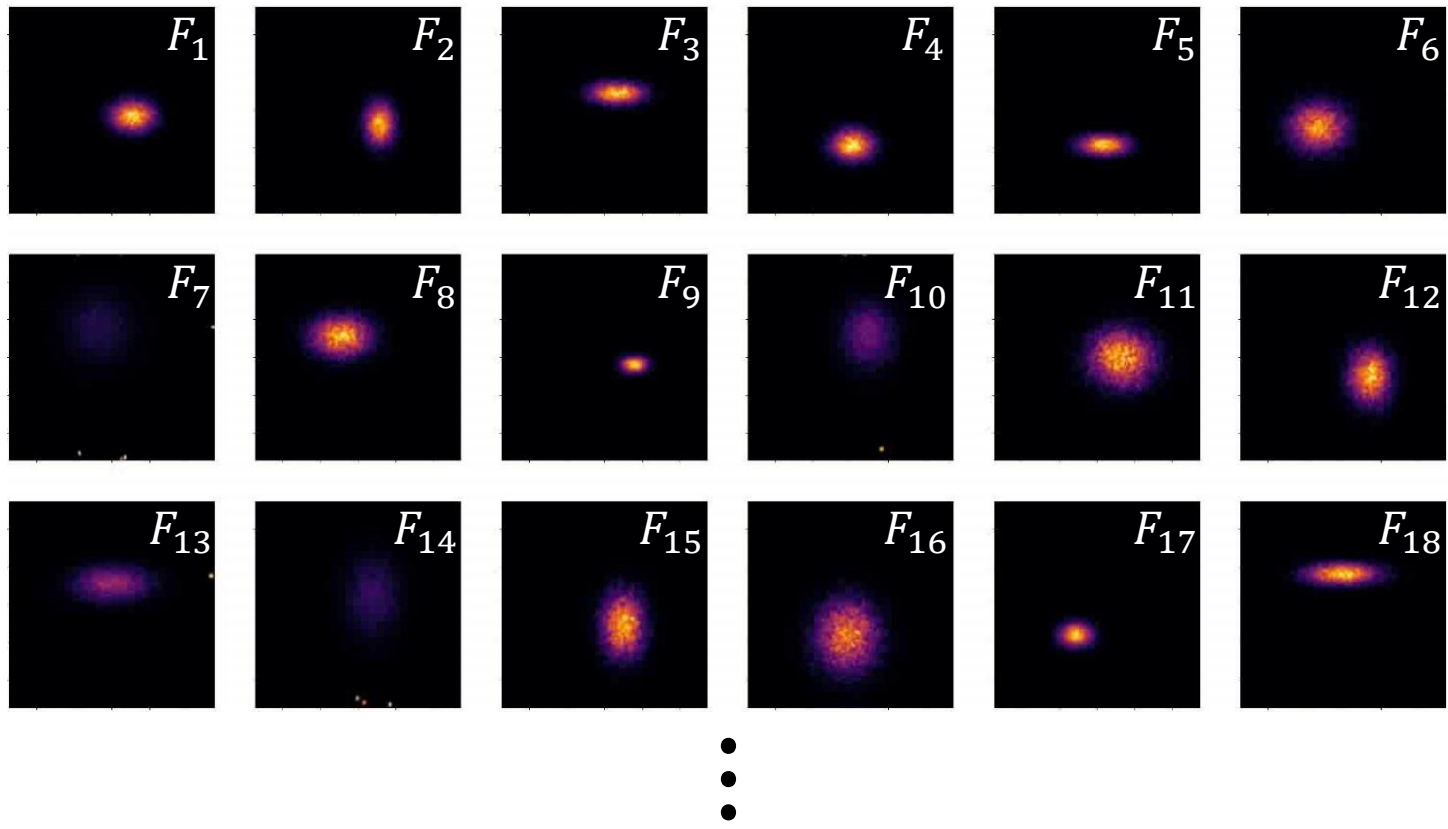


10,000個のマクロ粒子



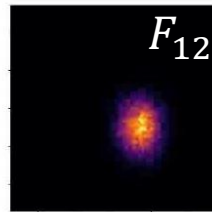
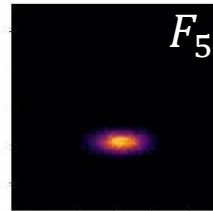
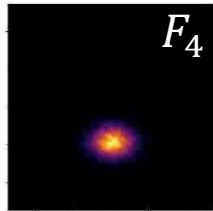
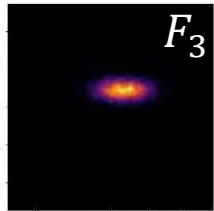
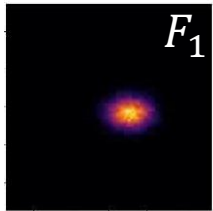
アルゴリズム設計

Initial Process: Calculate Fitness
各個体の適合度を計算

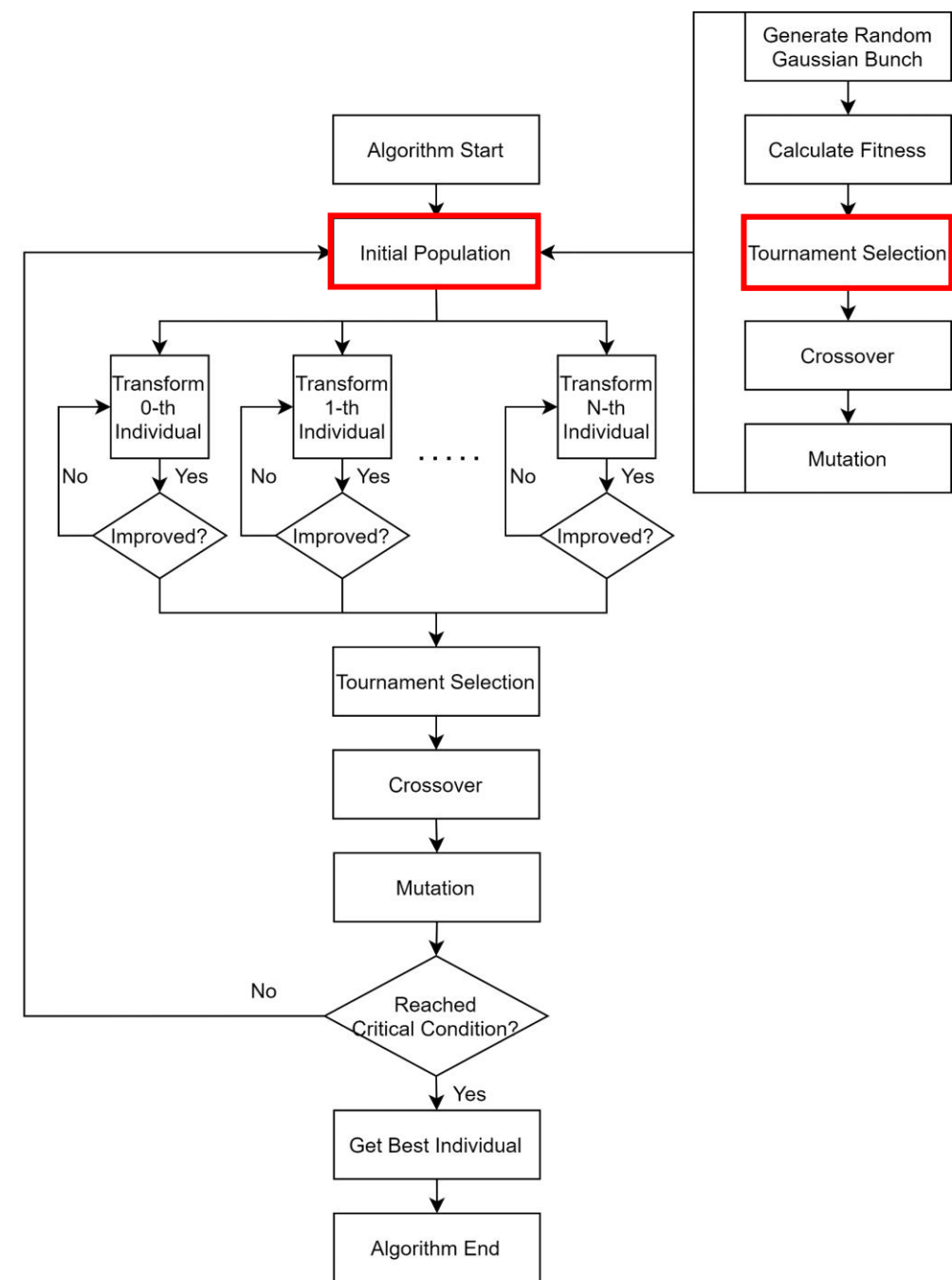


アルゴリズム設計

Initial Process: Tournament Selection
適合度に応じて個体を選び出す



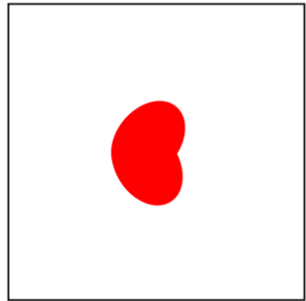
•
•
•



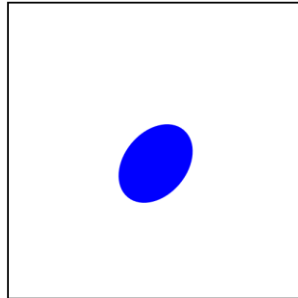
アルゴリズム設計

Initial Process: Crossover
選択された個体同士を混ぜる

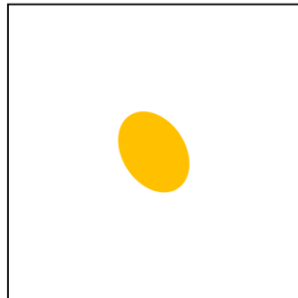
True Beam Shape



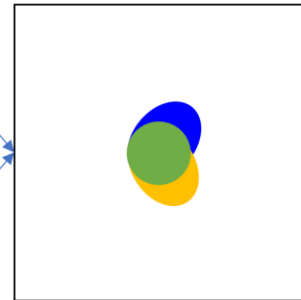
Candidate 1



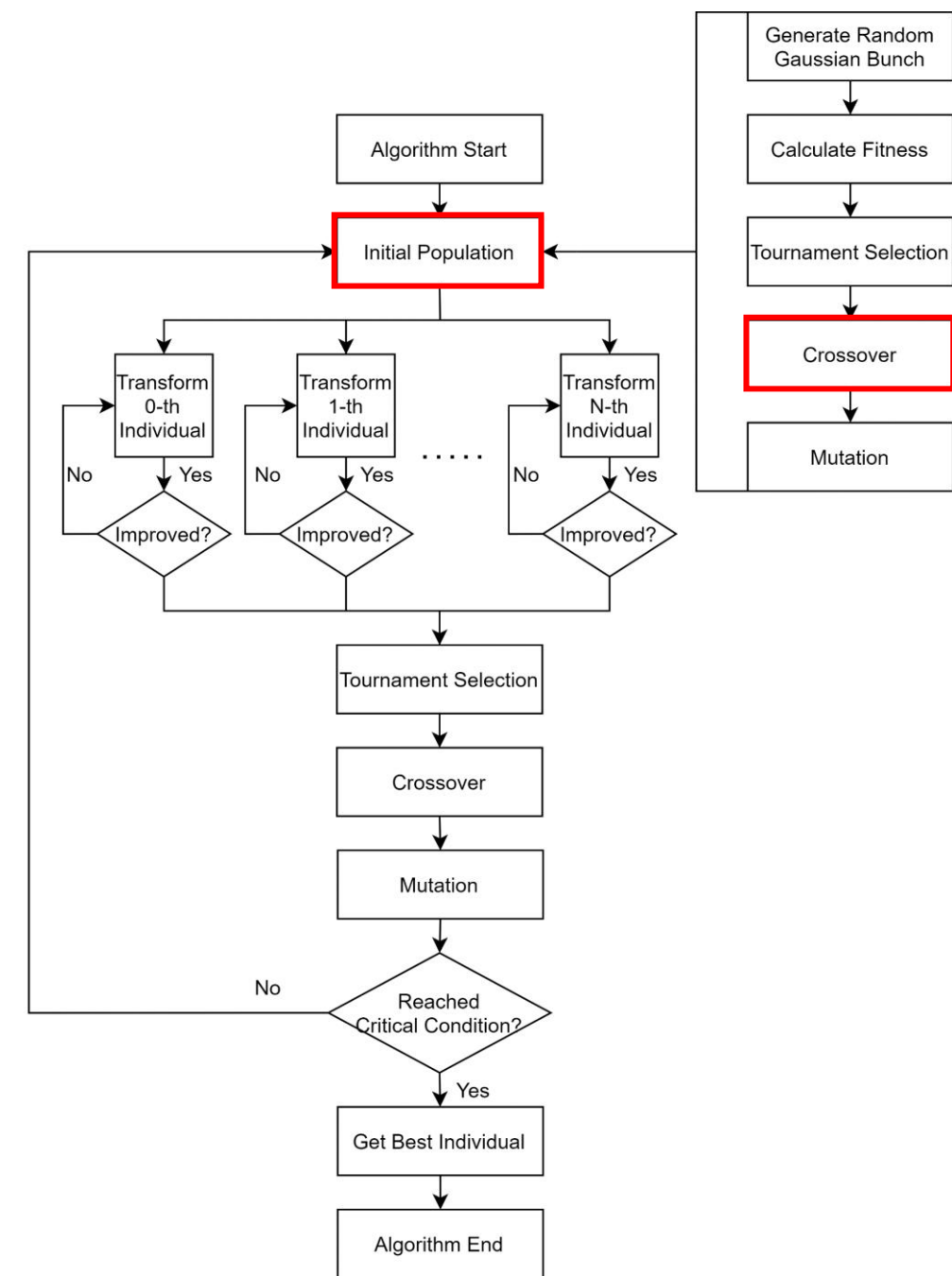
Candidate 2



Next Generation



選択された個体は「良い部分」を持っている。
交叉により、個体同士を混ぜることで、最終的に「良い部分」だけ持つ個体が残ることになる。



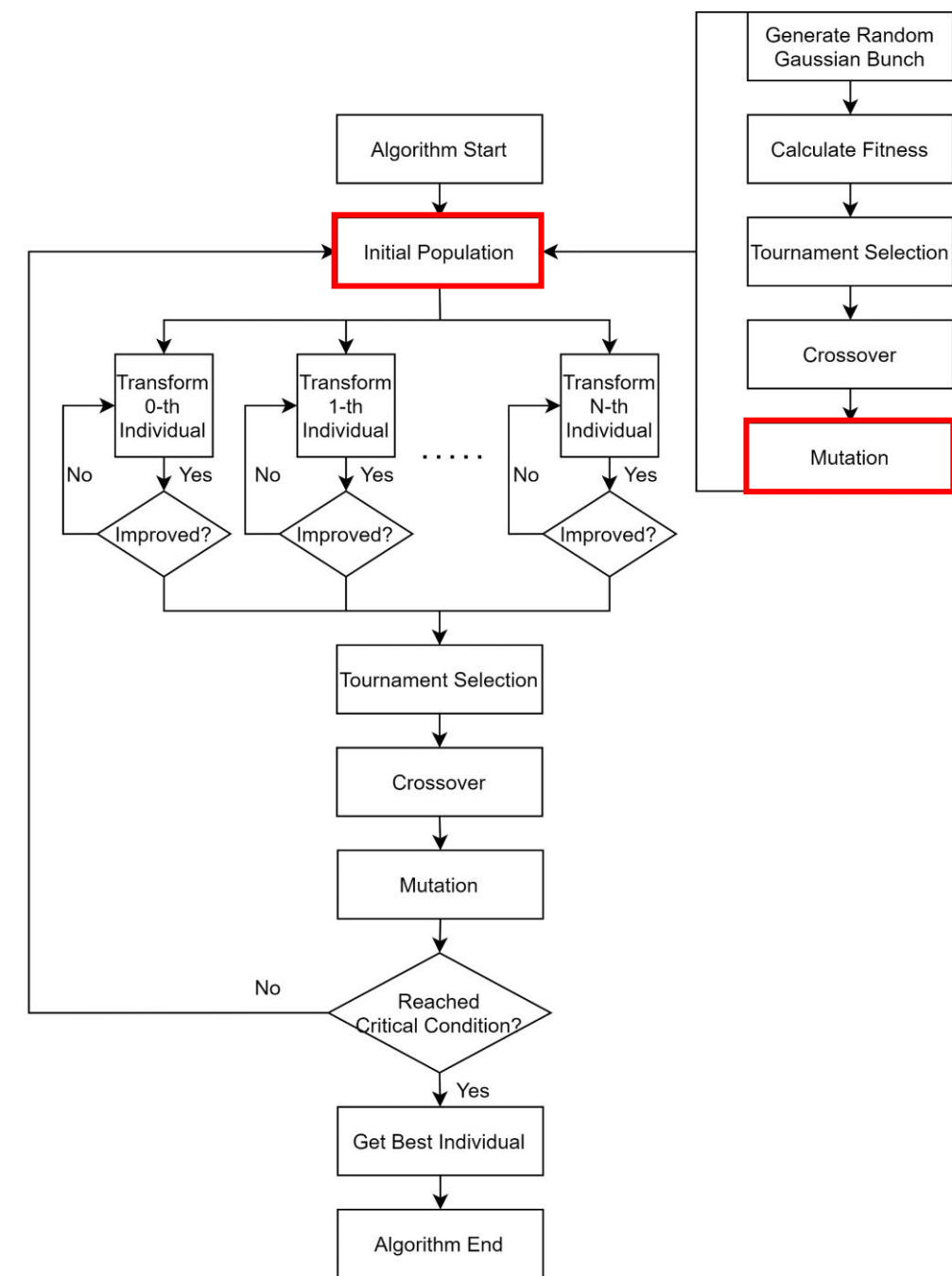
アルゴリズム設計

Initial Process: Mutation
突然変異を起こす

初期世代で生成された個体だけを使って素直に選択していくと、局所的最適解に陥る可能性が高くなる

生物進化の観点からいう、生物の多様性が欠如した状態となる

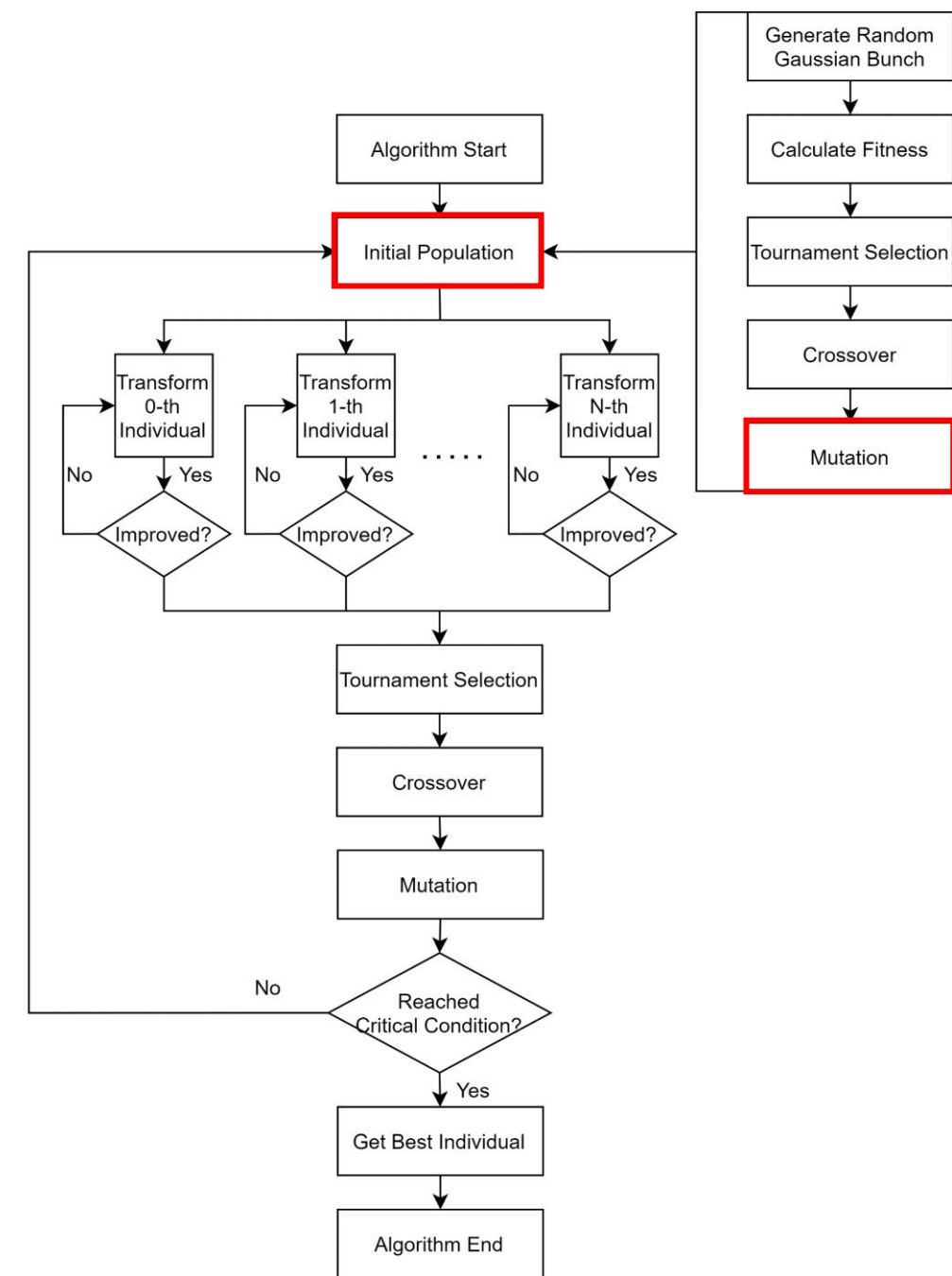
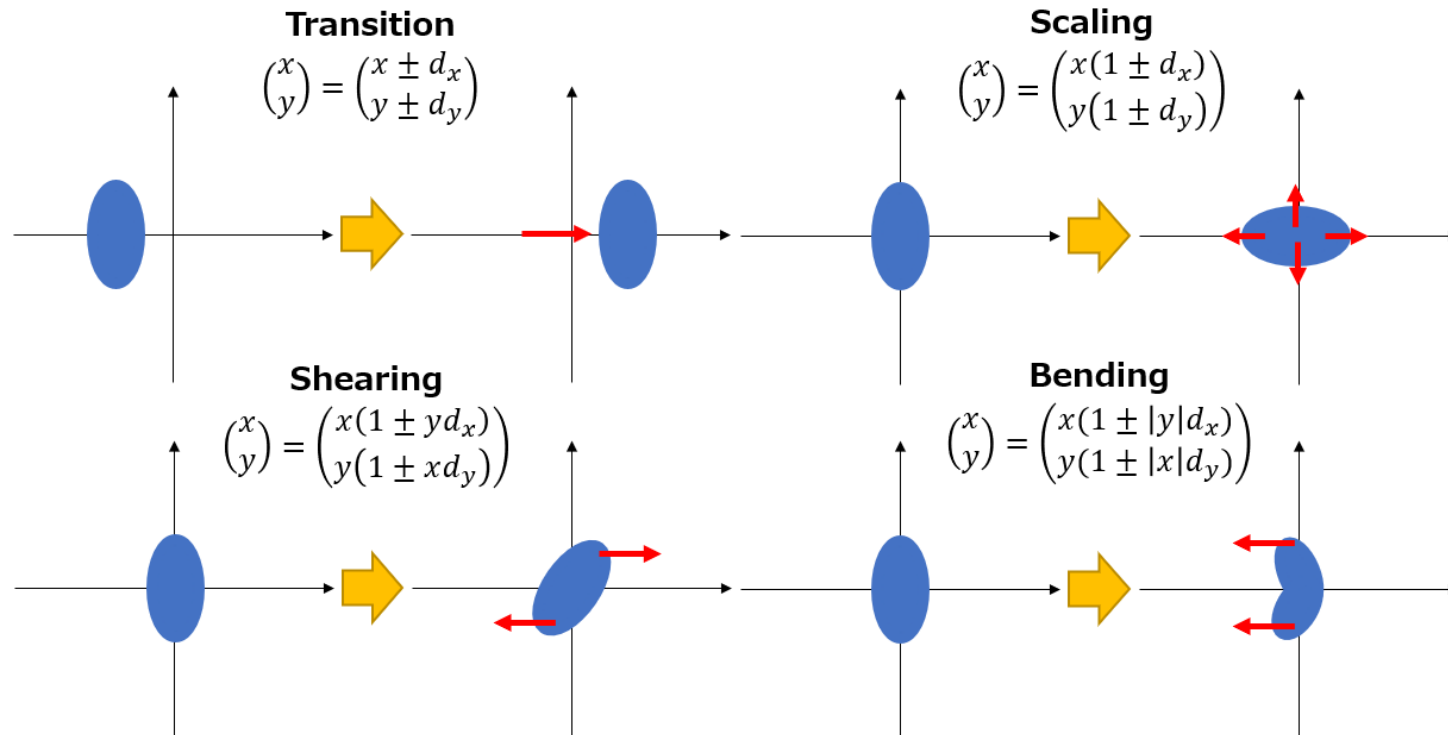
僅かな確率(1~5%)で集団から完全に離れた解を作り出すことで、もしも存在するより最適な解を探索する段階



アルゴリズム設計

Initial Process: Mutation

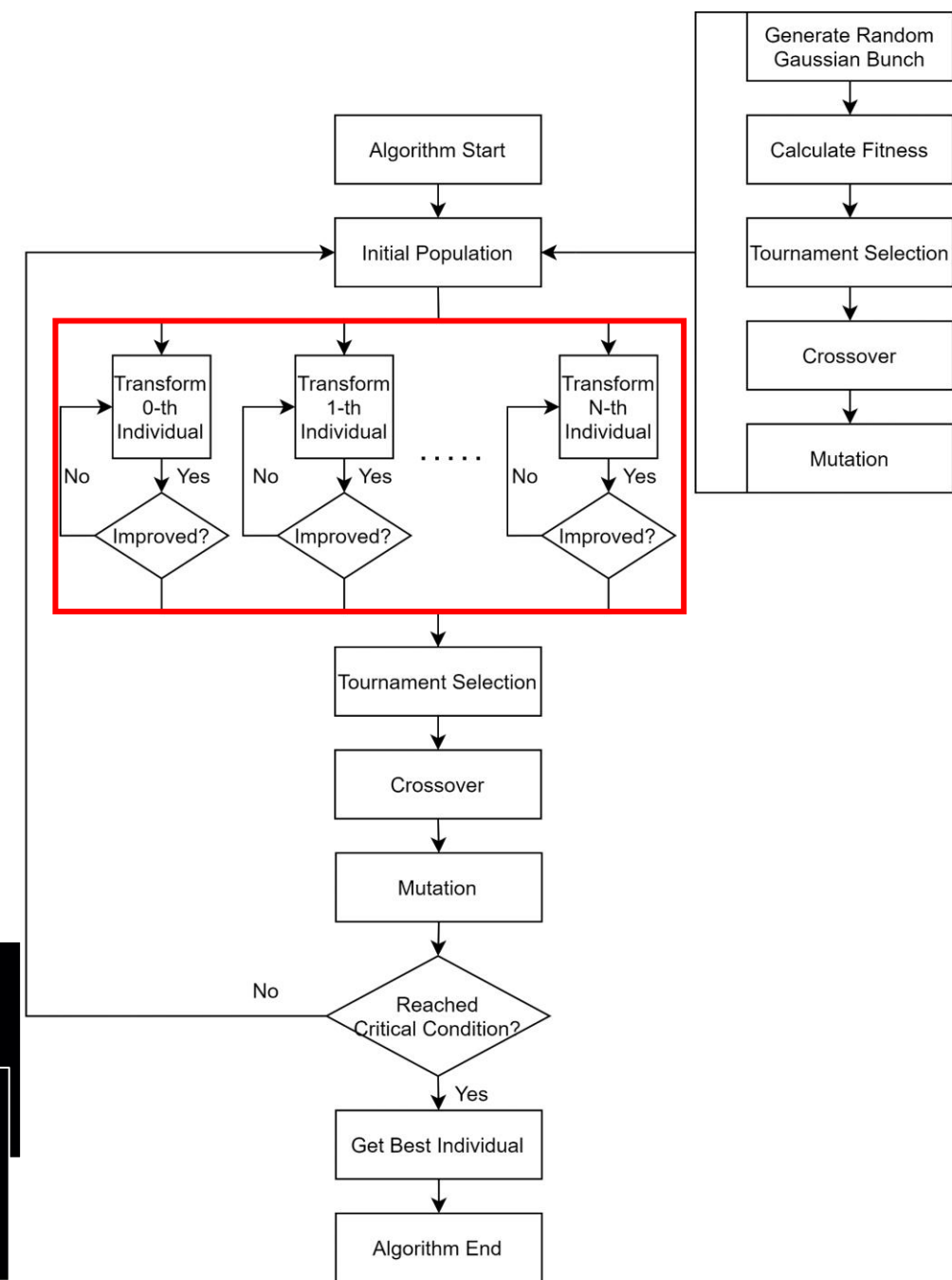
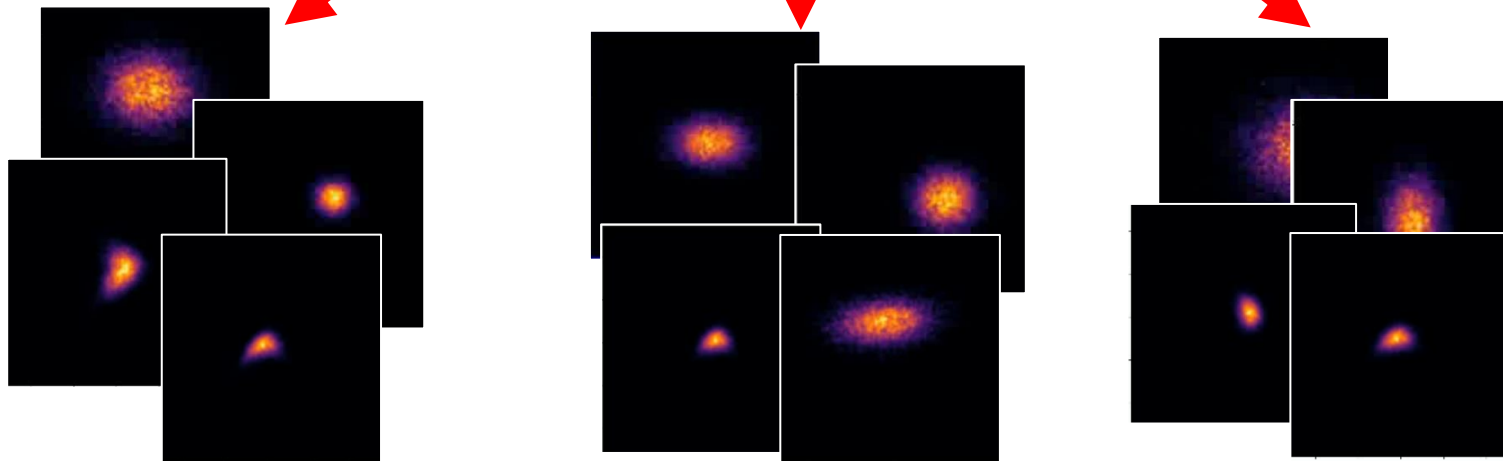
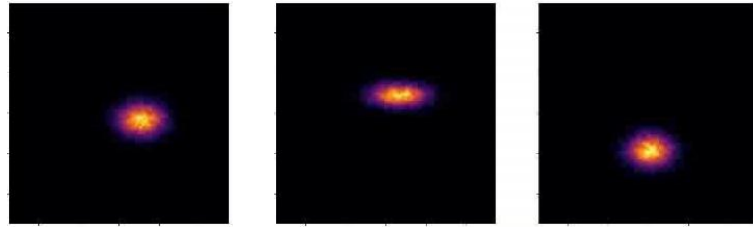
適合度と関係なくバンチにランダムな変形させる



アルゴリズム設計

Searching Optima

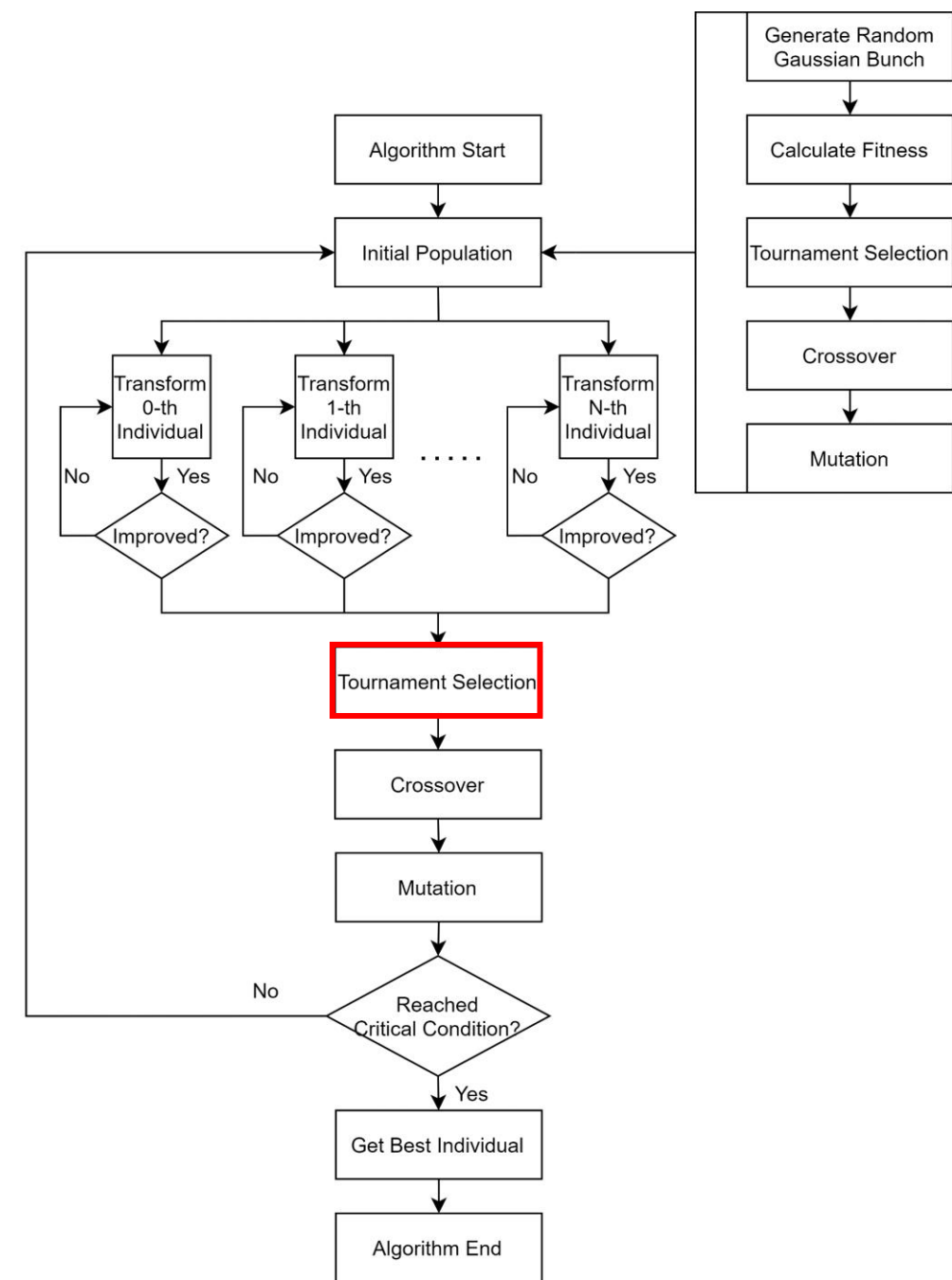
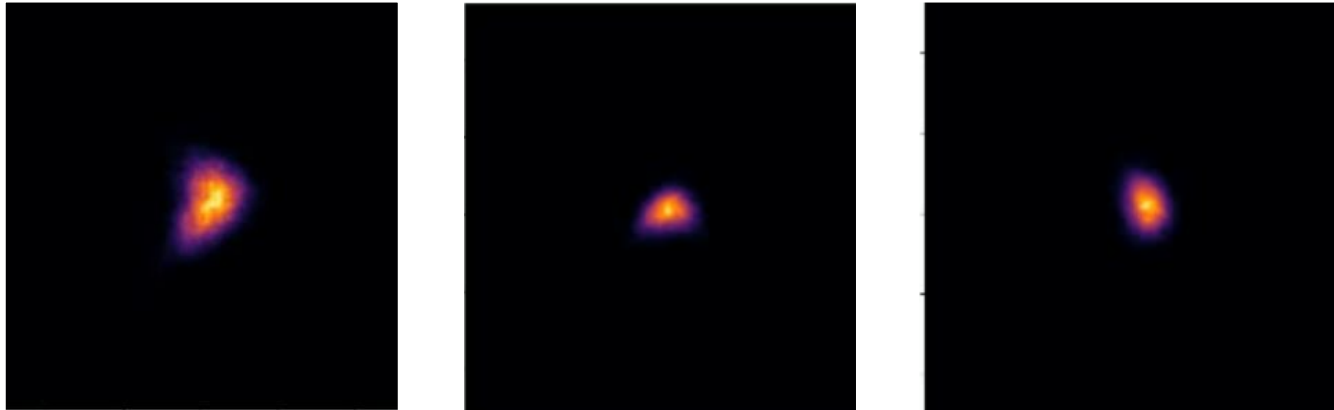
初期段階で生成された個体の形状を変えながら適合度が改善された形状を探索する
少しでも改善されたら、探索を中止



アルゴリズム設計

Tournament Selection

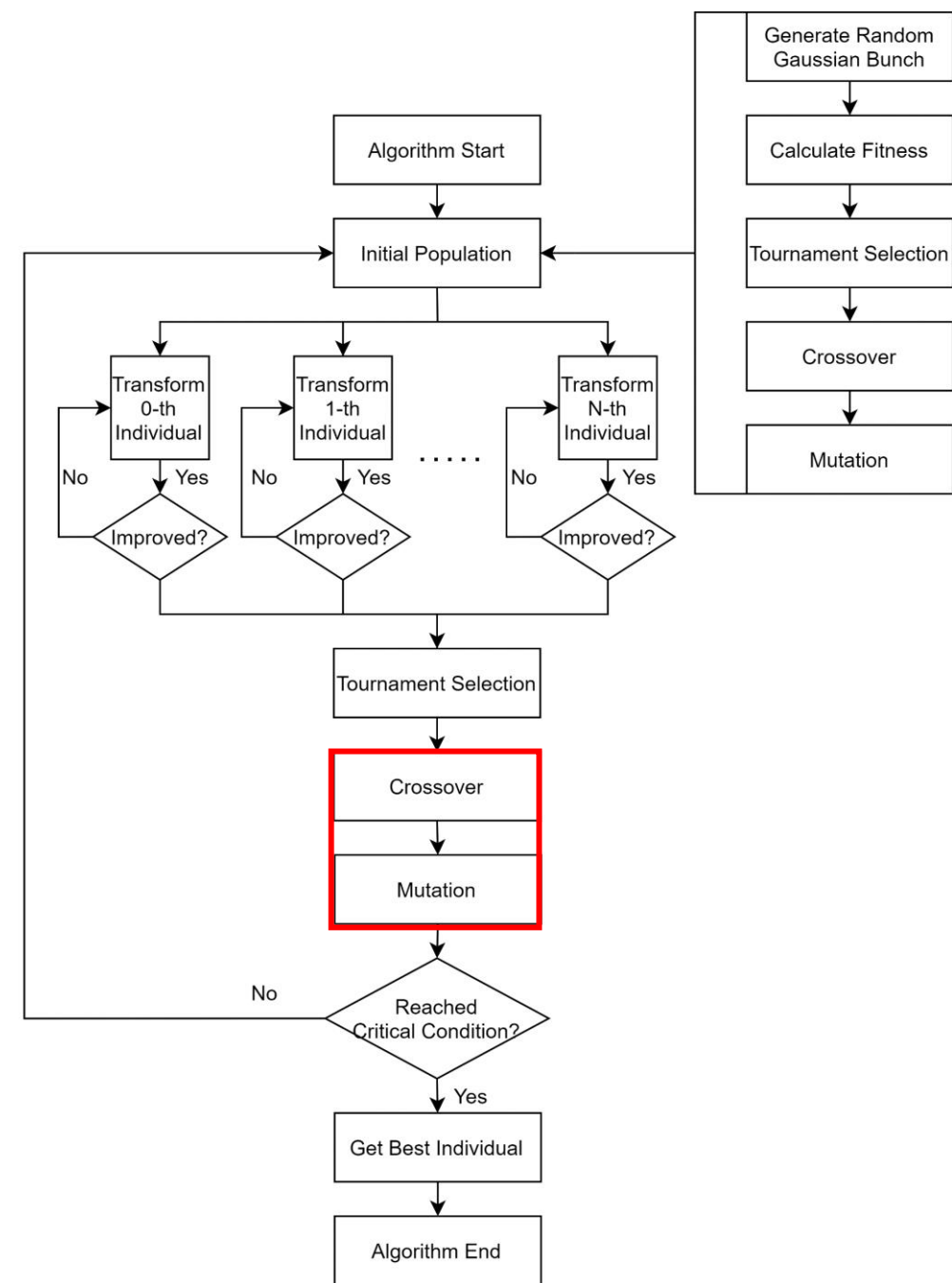
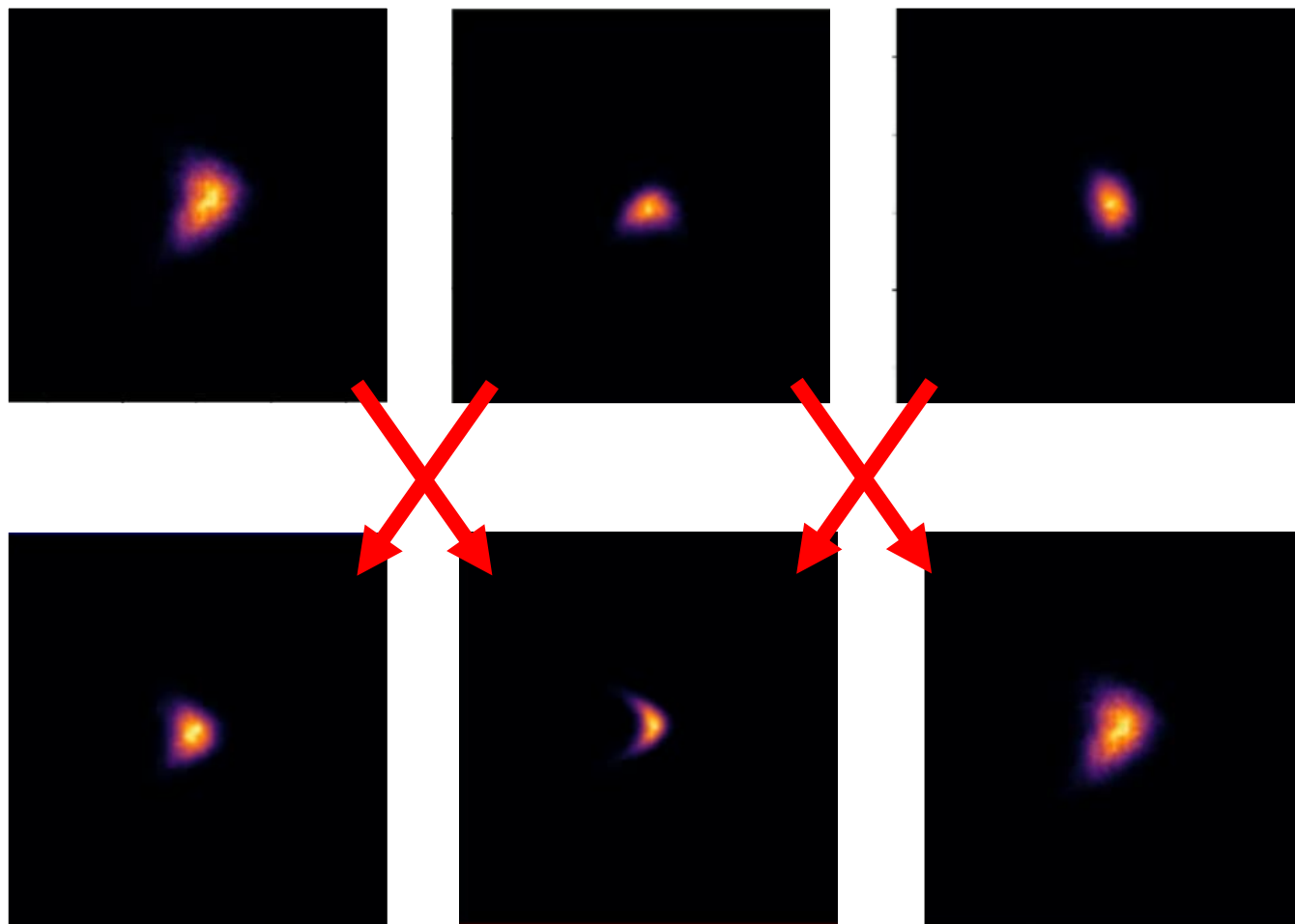
個体同士をトーナメント選択



アルゴリズム設計

Crossover & Mutation

個体同士をトーナメント選択及び突然変異

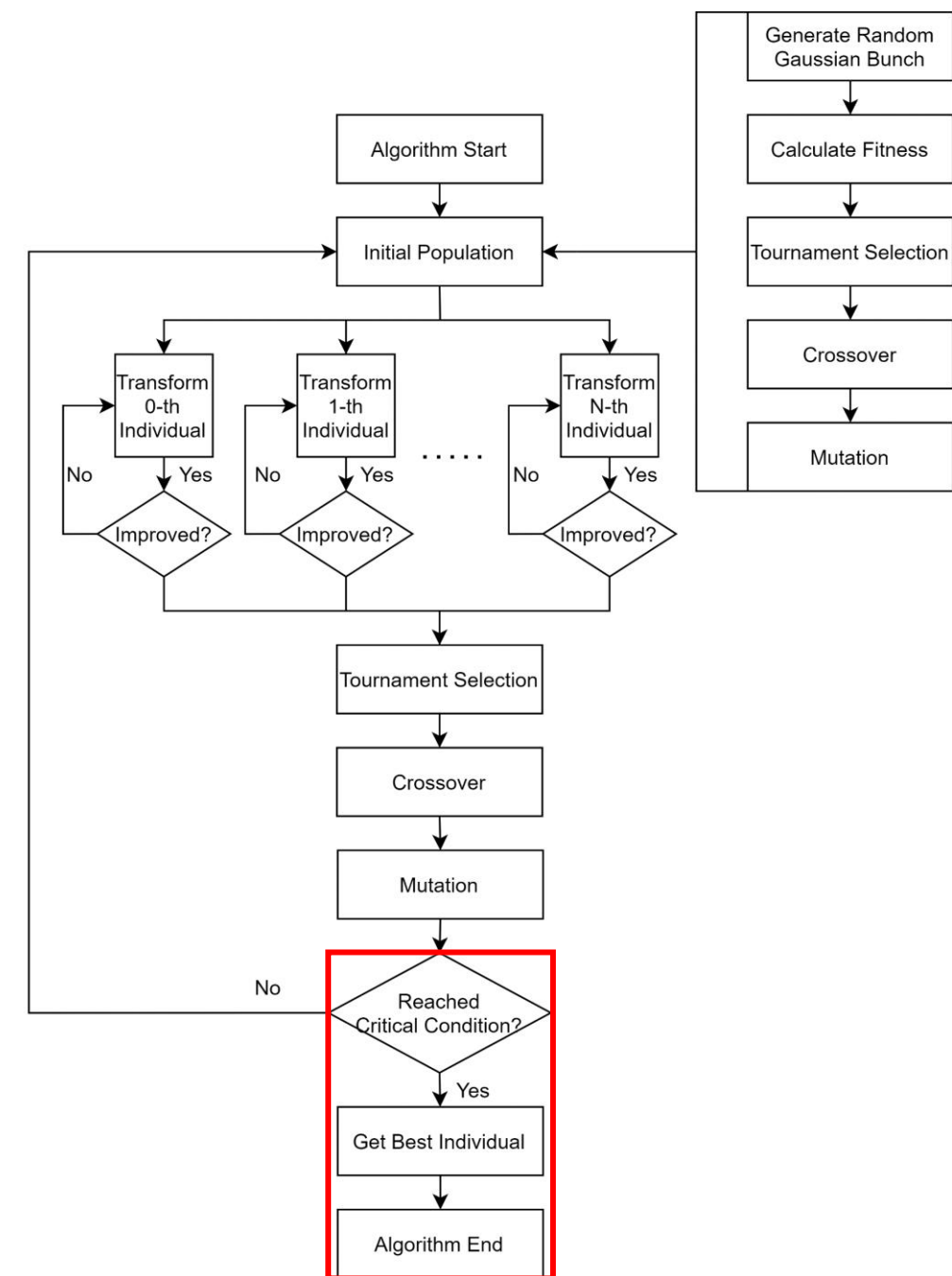


アルゴリズム設計

アルゴリズム停止条件

- 最大世代数の設定
- 目標する適合度を設定(検討中)
- 適合度が改善しないまま世代が経過すると停止(検討中)

停止条件が満たされたらアルゴリズムが停止し、最後の世代の個体中で適合度が一番良い個体を最適解として算出する



ビーム測定結果

- 先行研究の解析結果と比較
 - 以前の解析: 2台の多重極モーメント算出 → 四重極モーメントからエミッタンス算出 → エミッタンスとベータ関数の掛け算からビームサイズ算出
 - 現在の解析: 1台のモニターからモーメント算出 → アルゴリズムによりビームサイズ推定

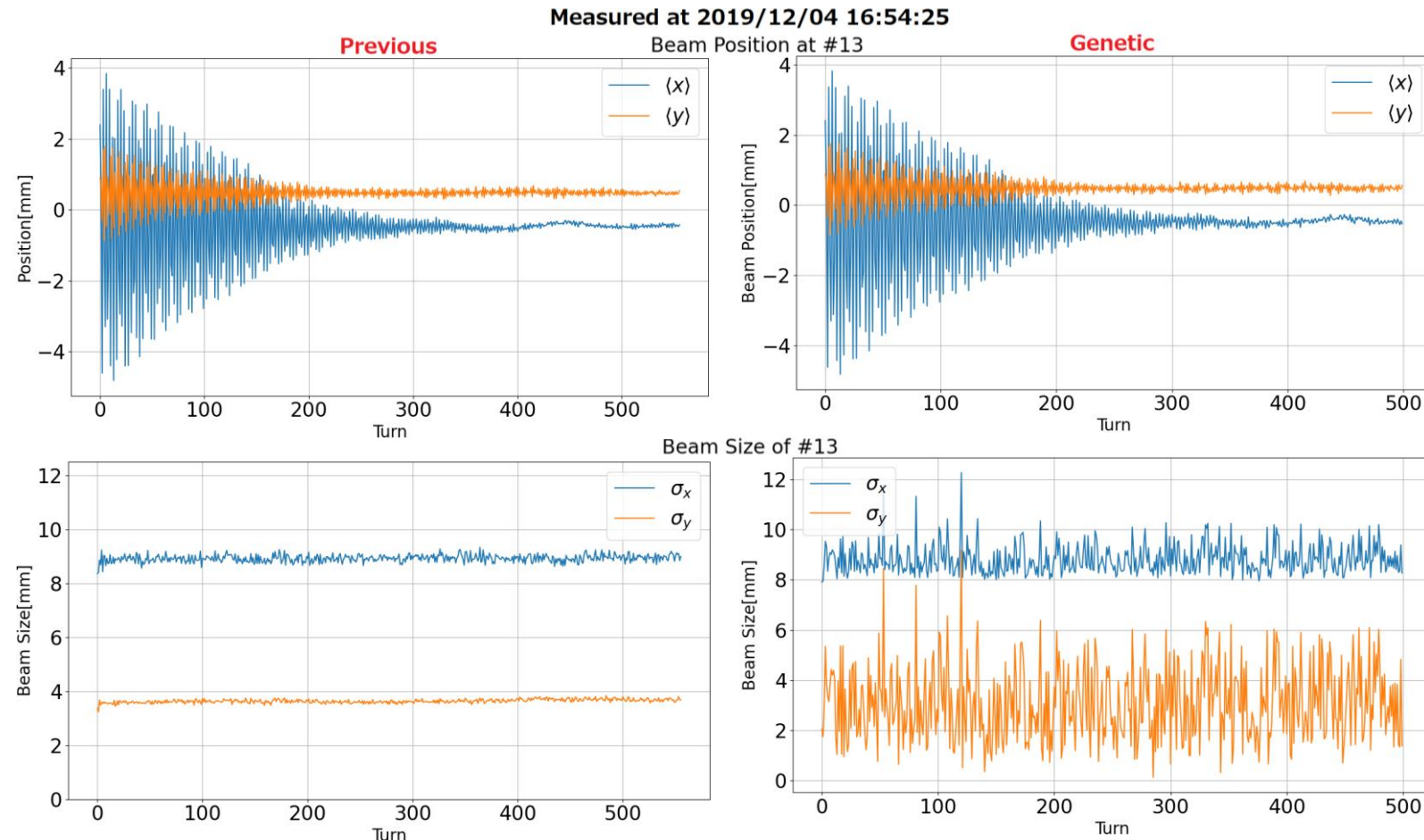
Beam Size

$$\sigma_{x,prev} = 8.9206 \pm 0.138 \text{ mm}$$

$$\sigma_{y,prev} = 3.6381 \pm 0.069 \text{ mm}$$

$$\sigma_{x,gen} = 8.8076 \pm 0.594 \text{ mm}$$

$$\sigma_{y,gen} = 3.0849 \pm 1.503 \text{ mm}$$



ビーム測定結果

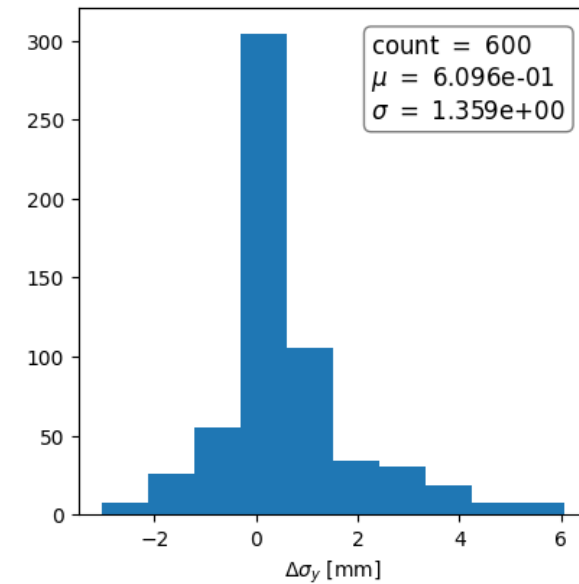
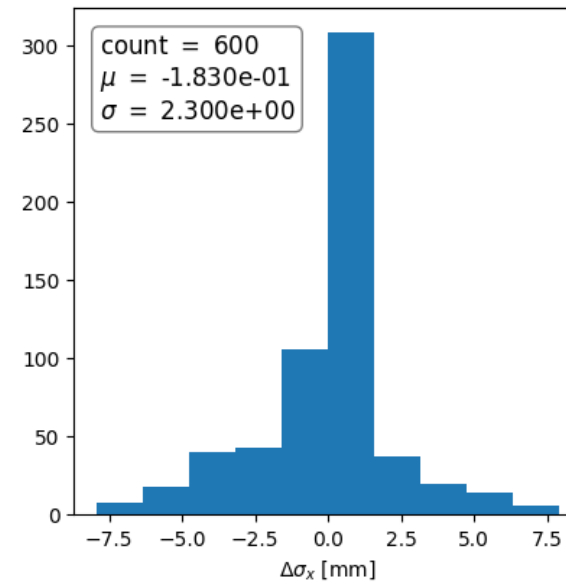
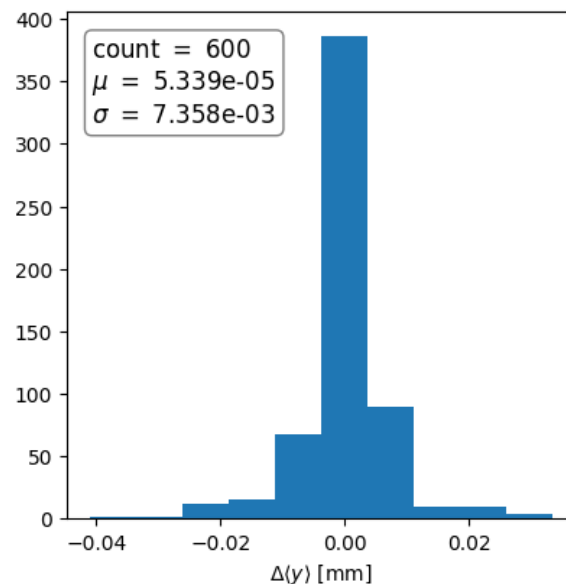
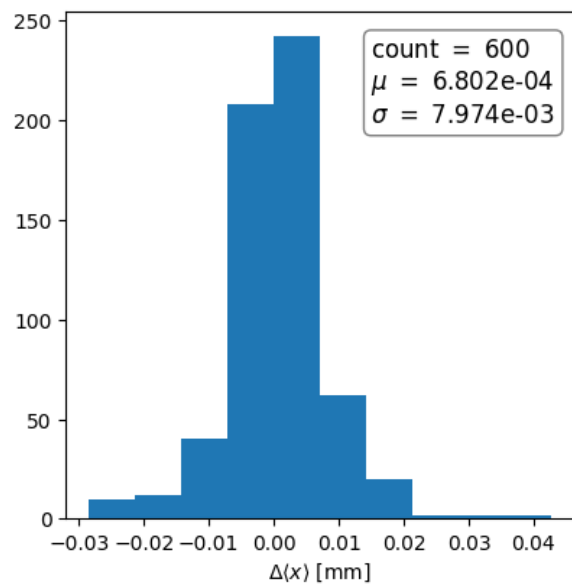
- ビームサイズ推定の結果、誤差の範囲を考慮すると、以前の解析結果と概ね一致している
- アルゴリズム自体のランダム性が高い
- そこで、1ターン分の解析を600回繰り返し、その結果を集計してみた
- ビームサイズに関しては、約1/2の確率で「良い解」が、1/2の確率で「悪い解」が出力される

$$\Delta\langle x \rangle = \langle x \rangle_{prev} - \langle x \rangle_{gen}$$

$$\Delta\langle y \rangle = \langle y \rangle_{prev} - \langle y \rangle_{gen}$$

$$\Delta\sigma_x = \sigma_{x,prev} - \sigma_{x,gen}$$

$$\Delta\sigma_y = \sigma_{y,prev} - \sigma_{y,gen}$$



まとめ

- 16電極ビームモニターは大強度ビームのビームサイズの測定のために設置された
- 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開発を行っている
- 実際ビームサイズの算出を行い、以前の解析方法とその結果を比較した
- まだアルゴリズムの性能が良いとは言えない段階
- 今後アルゴリズムの性能向上の方向性を確認した

今後の展望

- アルゴリズムの処理速度の改善を行う
 - 現在、1ターン分の解析に約5分かかる
 - プログラムをより効率よく書き直す & GPUコンピューティングを活用した高速化
- アルゴリズムの推定性能の向上を行う
 - 分布推定アルゴリズムの概念を導入し、非ガウシアン分布の形状の推定を行う
 - 多変量最適化アルゴリズムの概念を導入し、より効率よく最適化を行う
 - 不適切問題の対処

ご清聴ありがとうございました。