

深層学習を用いた光学系調整法の開発と実証

A Novel Method for Optical Adjustment with Deep Learning

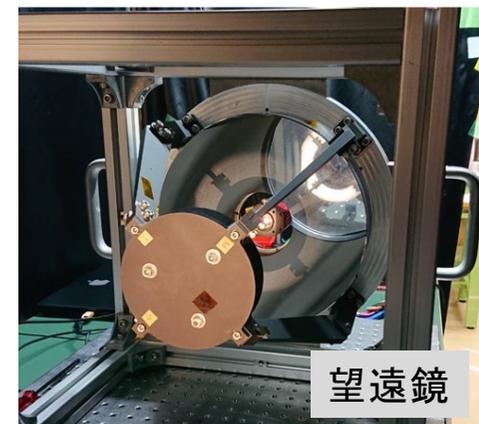
2025.11.5

関西学院大学 博士研究員
橋本遼

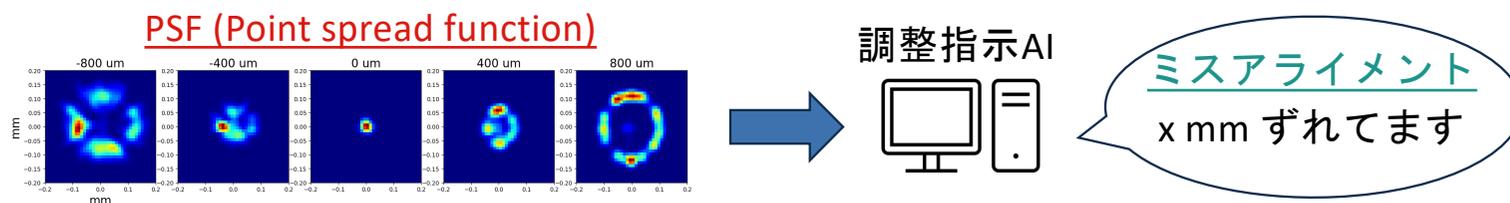
1. 人工知能・機械学習・深層学習について
2. 光学系調整モデルの開発
3. 実光学系を用いた実証

光学系のズレが光学性能に 深刻な劣化を引き起こす

しかしズレの評価試験と解析には
さまざまなコストがかかる . . .



単純な測定のみで、光学系の ミスアライメント を推定するモデル開発



深層学習モデルによるミスアライメント推定
+ 実光学系で実証

光学調整サイクル：近赤外望遠鏡の例

現状

望遠鏡の組み立て

- ・ 調整機構の考案
- ・ クリーンルームでの作業
- ・ トルク管理
- ・ 真空引き、冷却

光学性能の調整は不可欠

測定

- ・ ミラー自身の評価
 - 面間距離
 - 中心位置
 - 傾き
- ・ 結像性能測定

フィードバック

解析

- ・ 収差の推定
- ・ 原因の推定
- ・ 修正量の推定

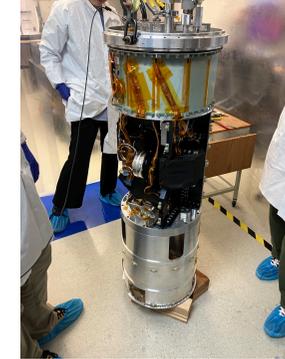
経験やシミュレーションによる情報が必要

調整サイクルは～1週間

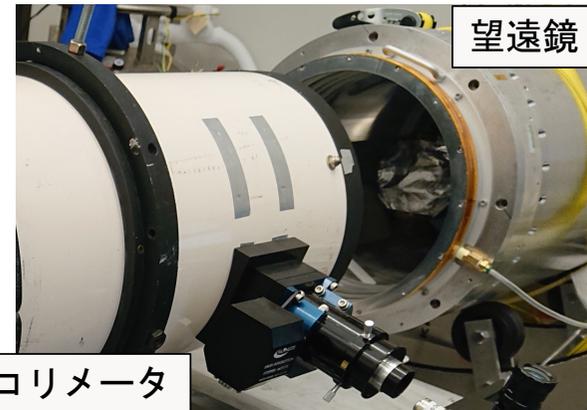
近赤外望遠鏡の作業風景



ロケットスキン



光学系の内部



望遠鏡

コリメータ

光学試験の様子

調整遅れは打ち上げ
スケジュールにクリティカル

現状

望遠鏡の組み立て

- ・調整機構の考案
- ・クリーンルームでの作業
- ・トルク管理
- ・真空引き、冷却



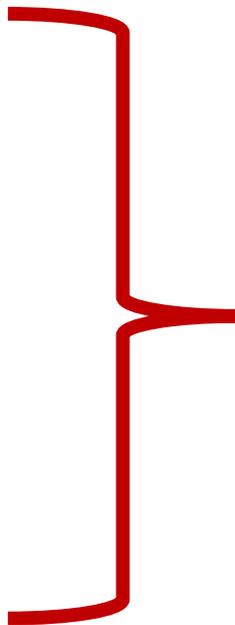
測定

- ・ミラー自身の調整
問題
- ・給電性能測定



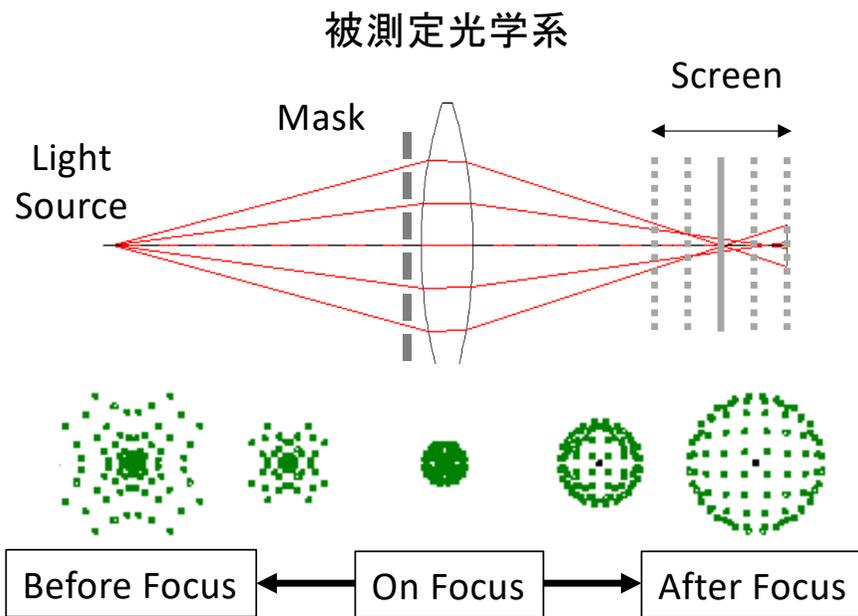
解析

- ・収差の
- ・原因
- ・性能の推定



AIによって測定・解析を
簡略・自動・短縮

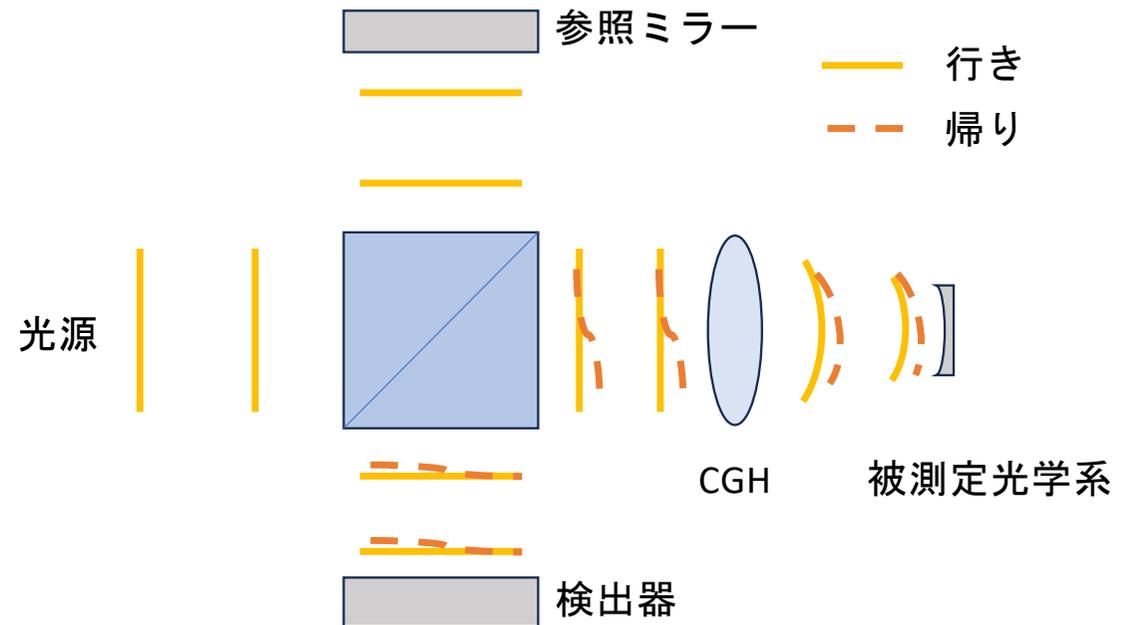
ハルトマンテスト



光源をマスクを用いて有限の光線ベクトルにして解析

マスクをつけるため、その試験しかできない

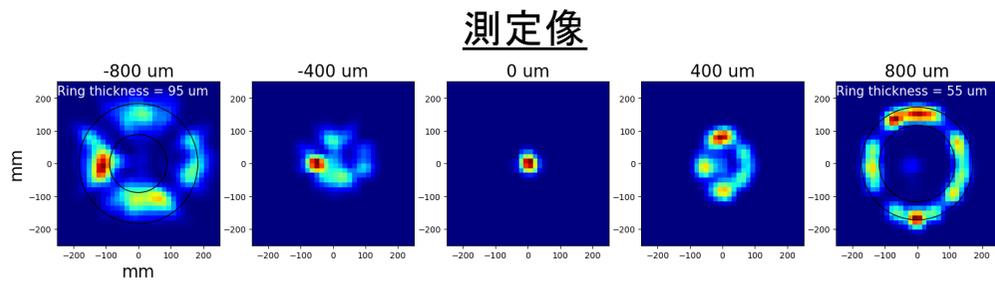
Computer Generated Hologram + 干渉計



対象光学系に合わせた波面をCGHによって作成し、波面誤差を検出

- ・ CGHが一点もの
- ・ CGH自身のアライメントが必要

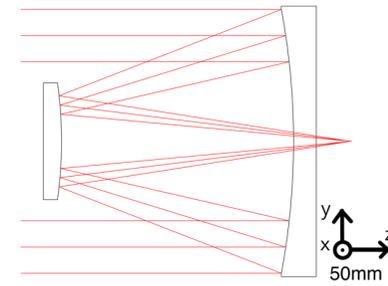
被測定光学系単体で取得できるPSF（星像）からズレを予測したい



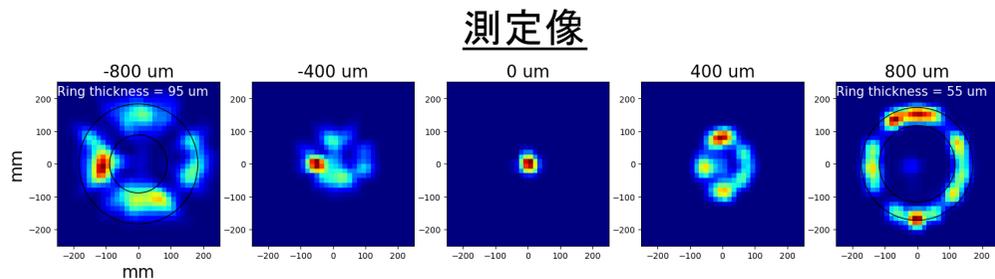
input



x? mm



測定像をみただけでは、感覚的にしかわからない

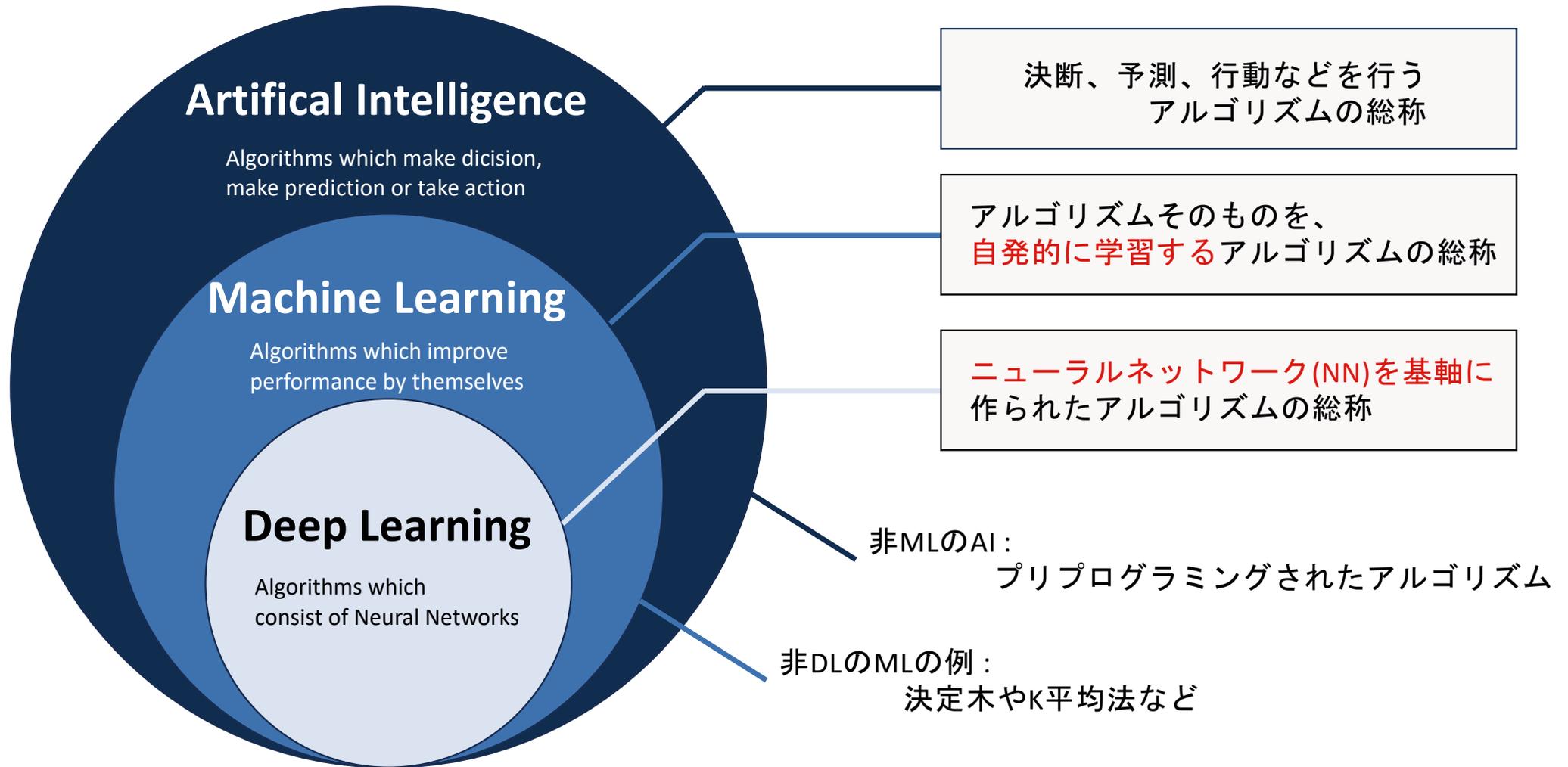


input



ミスアライメント
x mm ずれてます

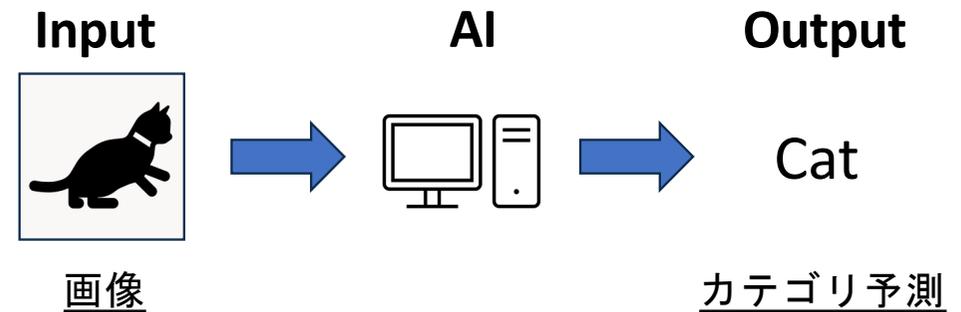
データをインプットすると、定量的に解答を出力



1. 学習データセット

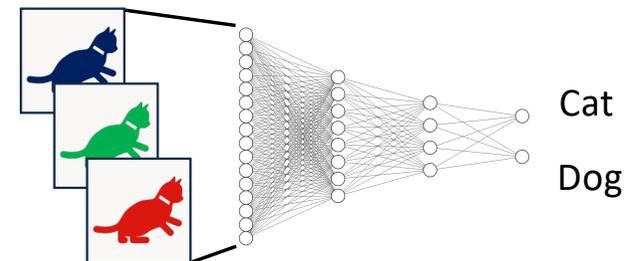
何をinputして何をoutputするか？
どうやって集めるか？

それぞれの分野の専門性が求められる



2. モデルの構造

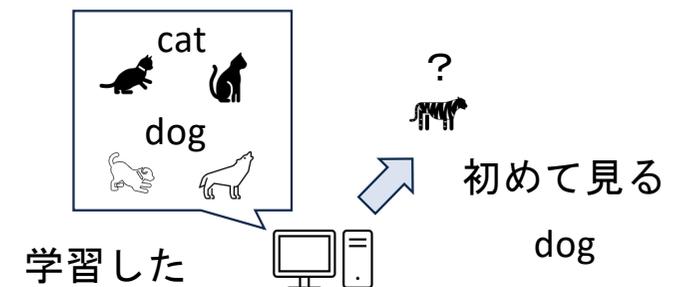
層の深さ・最適化アルゴリズム・
活性化関数・・・etc



3. モデルのトレーニング

汎化性・頑健性を評価

未学習のデータから正しく予測できるか？



学習の精度や効率は、
データセット内のデータ数や
クオリティに強く依存する

データセットの用意自体が課題

多くの課題ではここがボトルネック

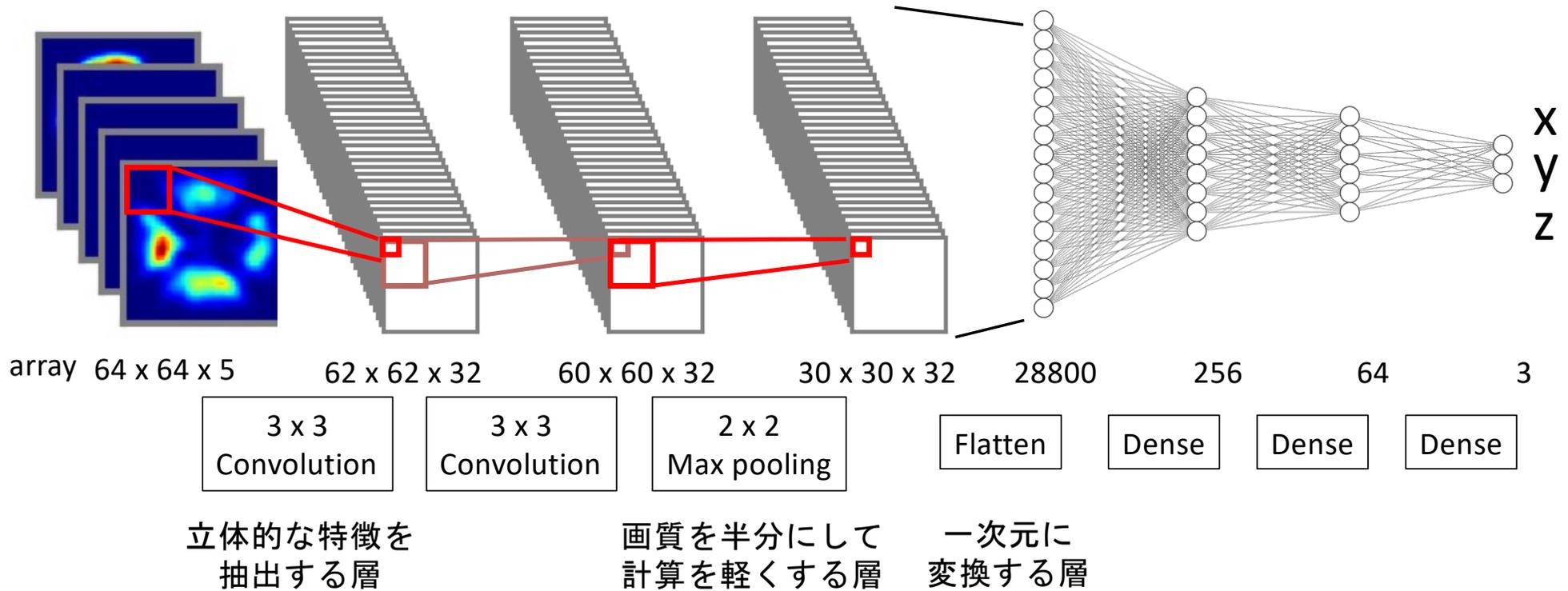
コスト・時間・専門知識が必要



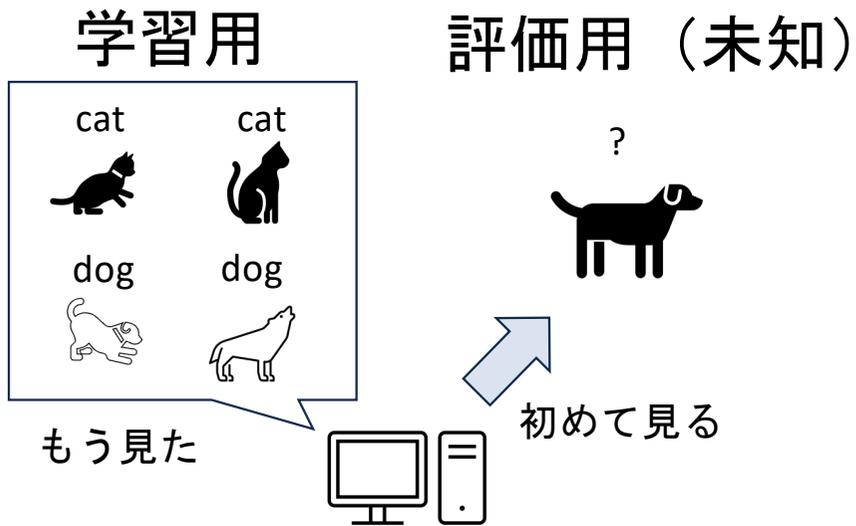
手書き文字認識モデルのための
MNISTと呼ばれるデータセット

サンプル数:60000

PSFから、光学素子のずれ量 x, y, z 予測する例



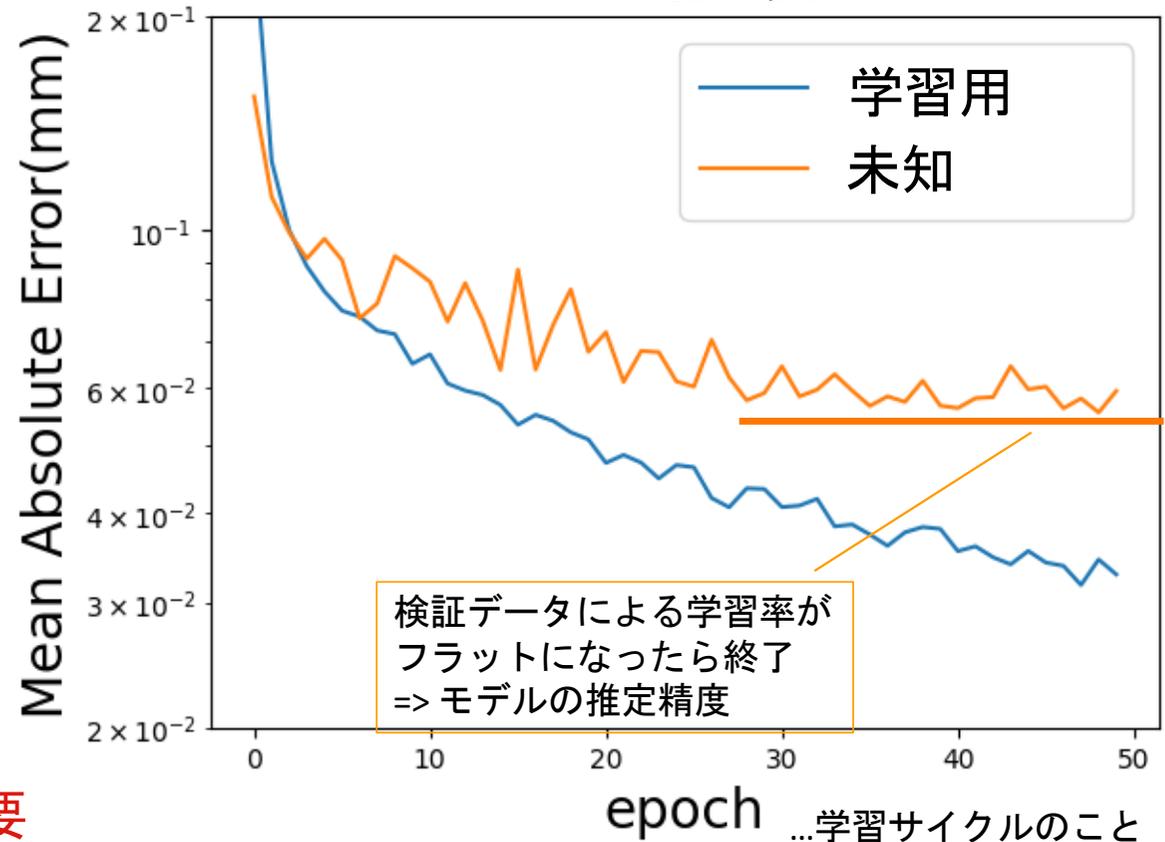
データセットを学習用と検証用に分割して、性能評価する

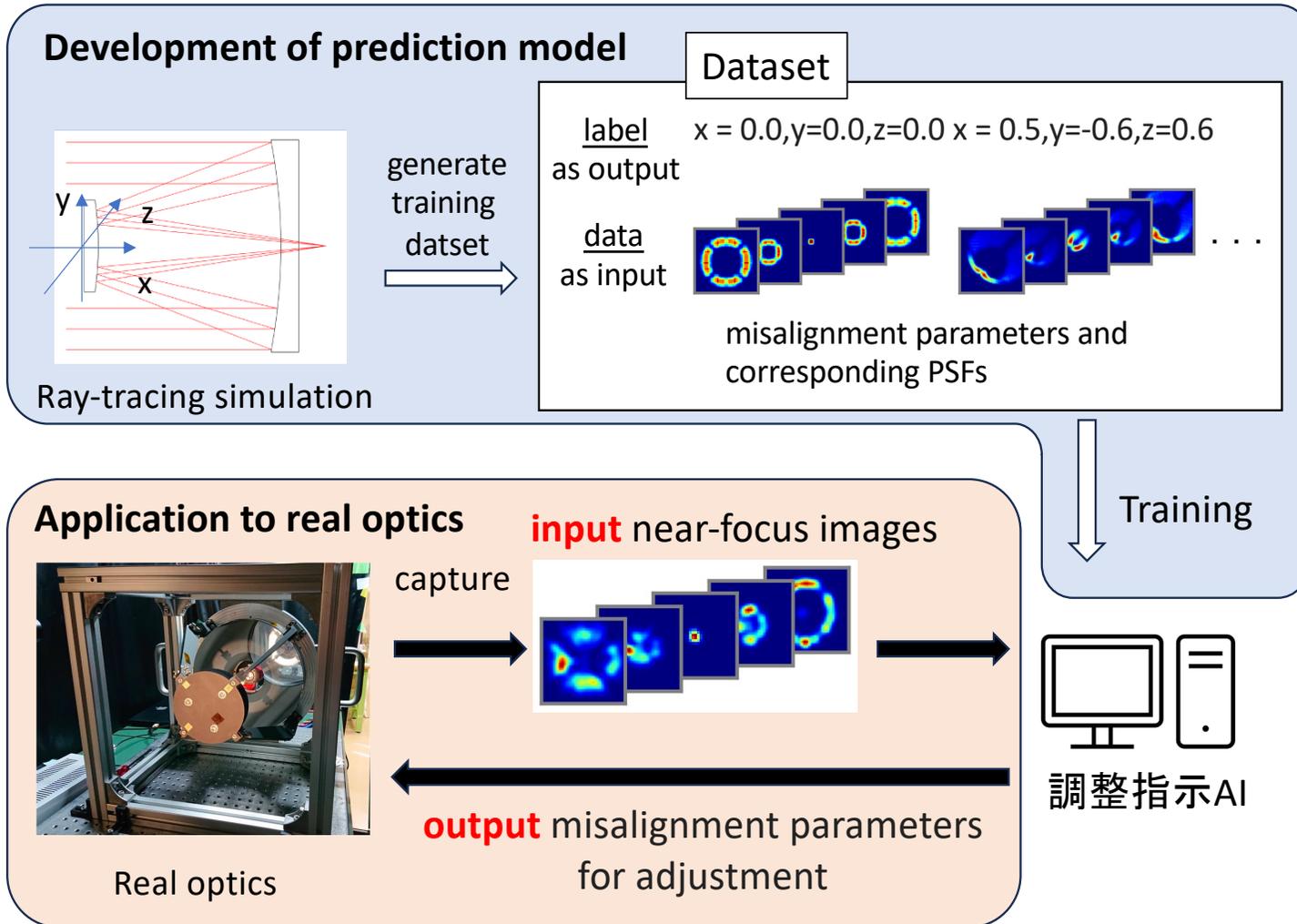


予測に用いるパラメータが莫大であるため、
完全なパターン暗記ができてしまう

=> **モデルが見たことのない
データで検証することが重要**

モデルの性能の見方





光学系調整モデルの開発

1. シミュレーションを用いたデータセットの準備
2. モデルの構造決定
3. 学習を行い、精度を評価

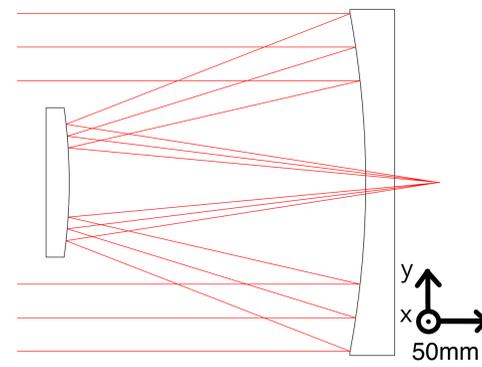
実光学系への適応

1. 実機にてPSFの取得
2. 学習済みモデルで予測
3. 予想量に応じて光学系を調整

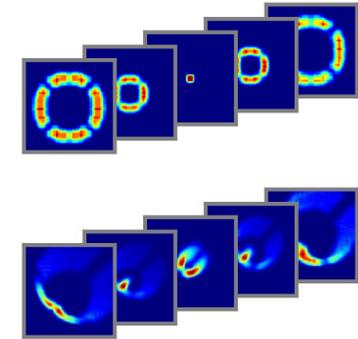
学習データセット

シミュレーションによって
データ数の問題を克服

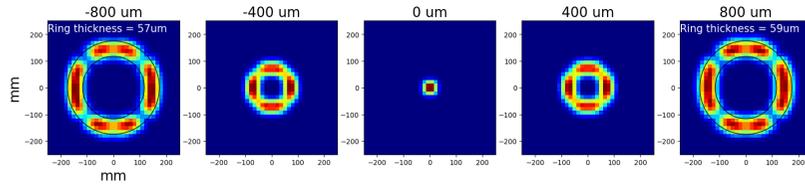
光線追跡シミュレーション



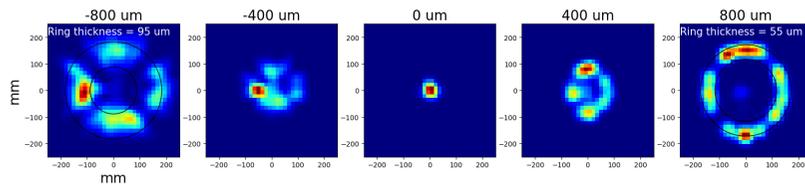
シミュレーション例



シミュレーション



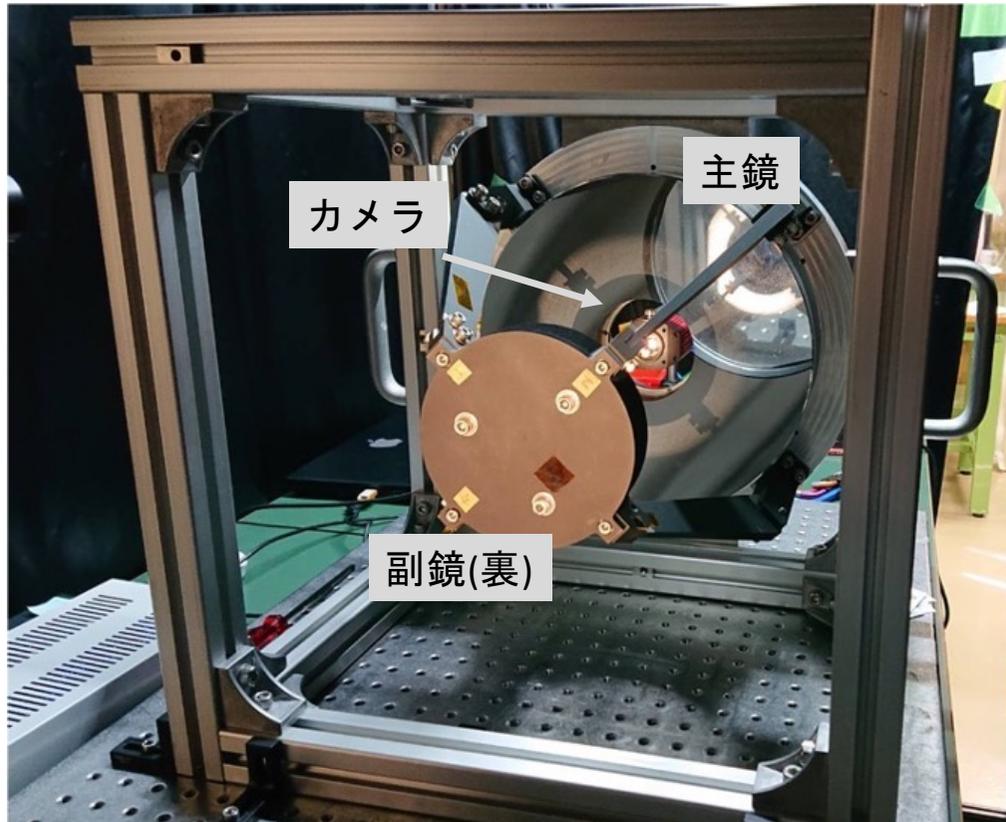
測定データ



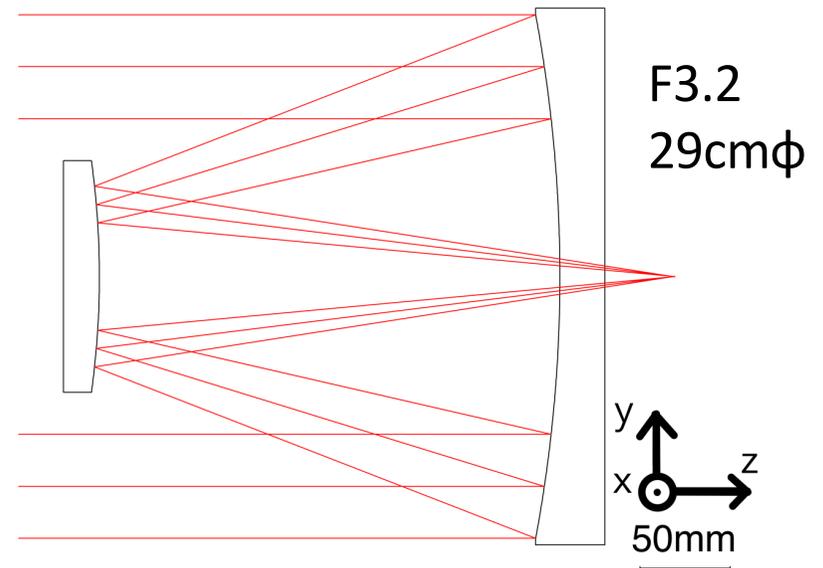
シミュレーションと
現実のデータではクオリティに差が

ちゃんとAIは現実データに適応できるのか？

実光学系を用いて、実証的にモデルの性能を検証

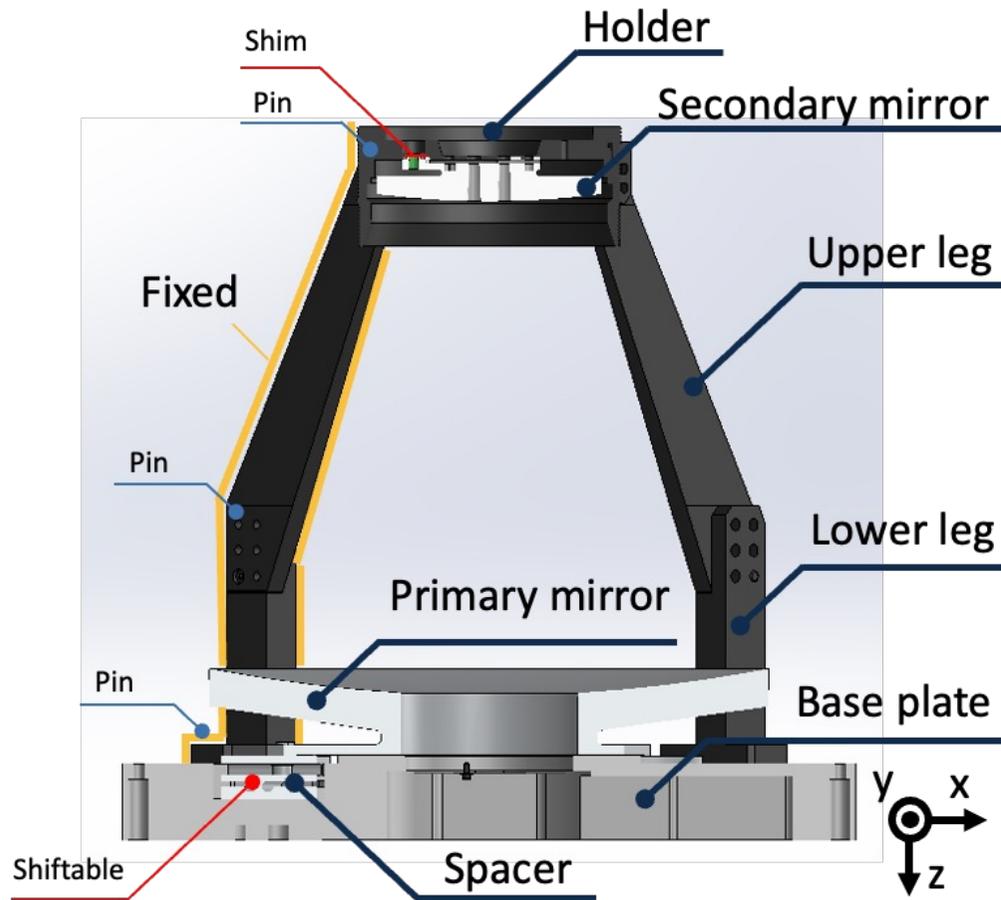


実験セットアップ写真
コリメート光が手前から入射

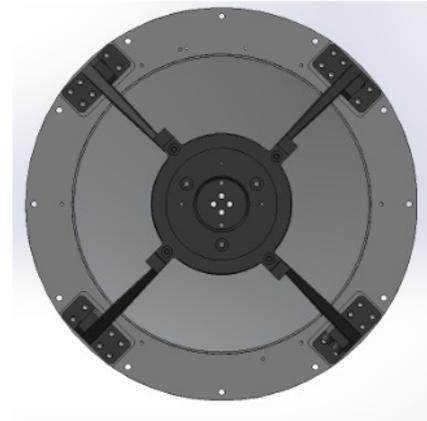


光線追跡シミュレーション

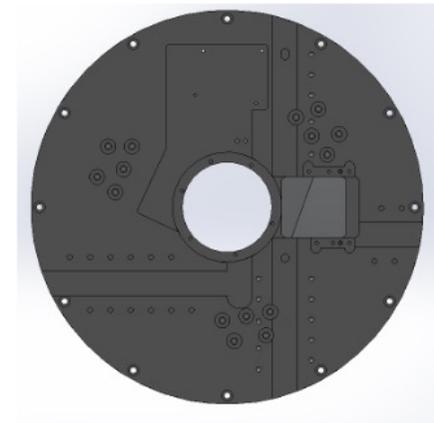
副鏡のx,y,zのずれを予測



望遠鏡の機械的構造



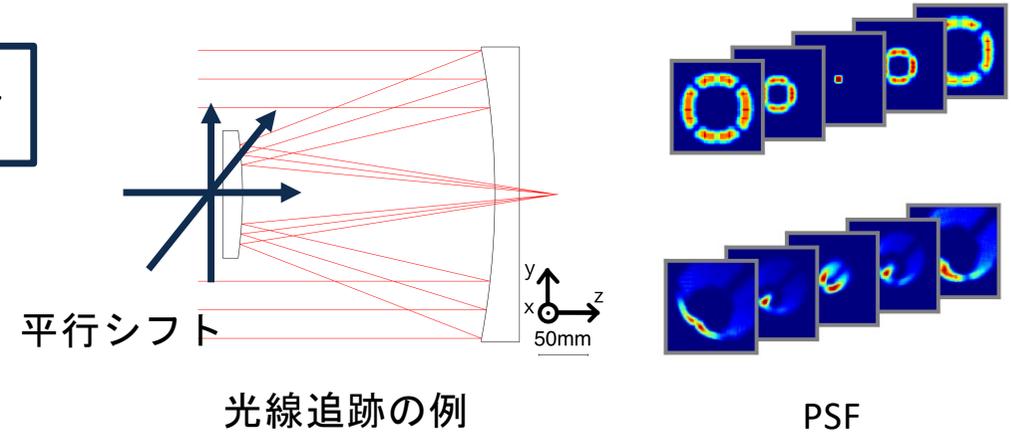
表側



裏側

光線追跡シミュレーション

光学素子に公差範囲でズレを与え、
対応したPSFを生成



利点

スクリプトから自動で生成可能

幾何学的光線追跡の範囲で精度は高い

実験で変化できないパラメータも対象にとれる

面形状など

難点

現実に現れる不定性の再現は
開発者の技量に依存

シミュレーションのに用いた光学パラメータ

	Items	Telescope
Telescope parameter	Aperture Size	29cmφ
	F value	3.2
Simulation	Number of Rays	61 × 61
	Range	±1000 mm in x-y plane ±5000 mm in z
	Interval	100 μm /Step
	Number of Data	44541 samples
	Training ratio	50:50
Image Processing	pixel size	5.2 μm sq
	number of pixels	64 × 64
	Focus pitch	400 μm × 5 slices

2.モデルの構造

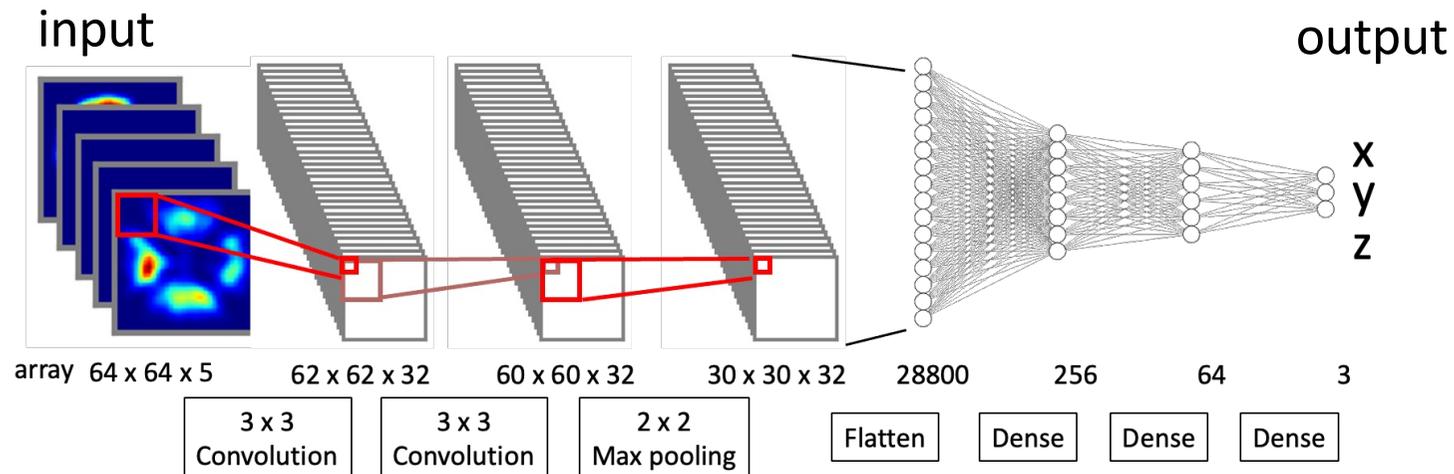
18/25

Alex-Net*を元に、経験的にモデルを作成

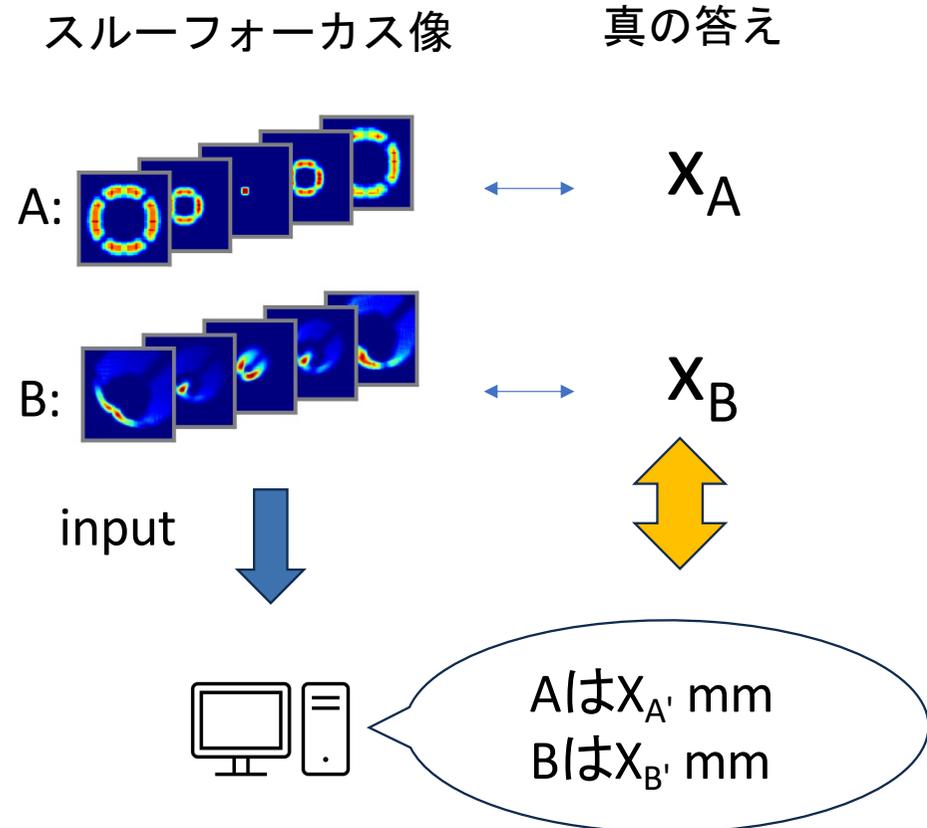
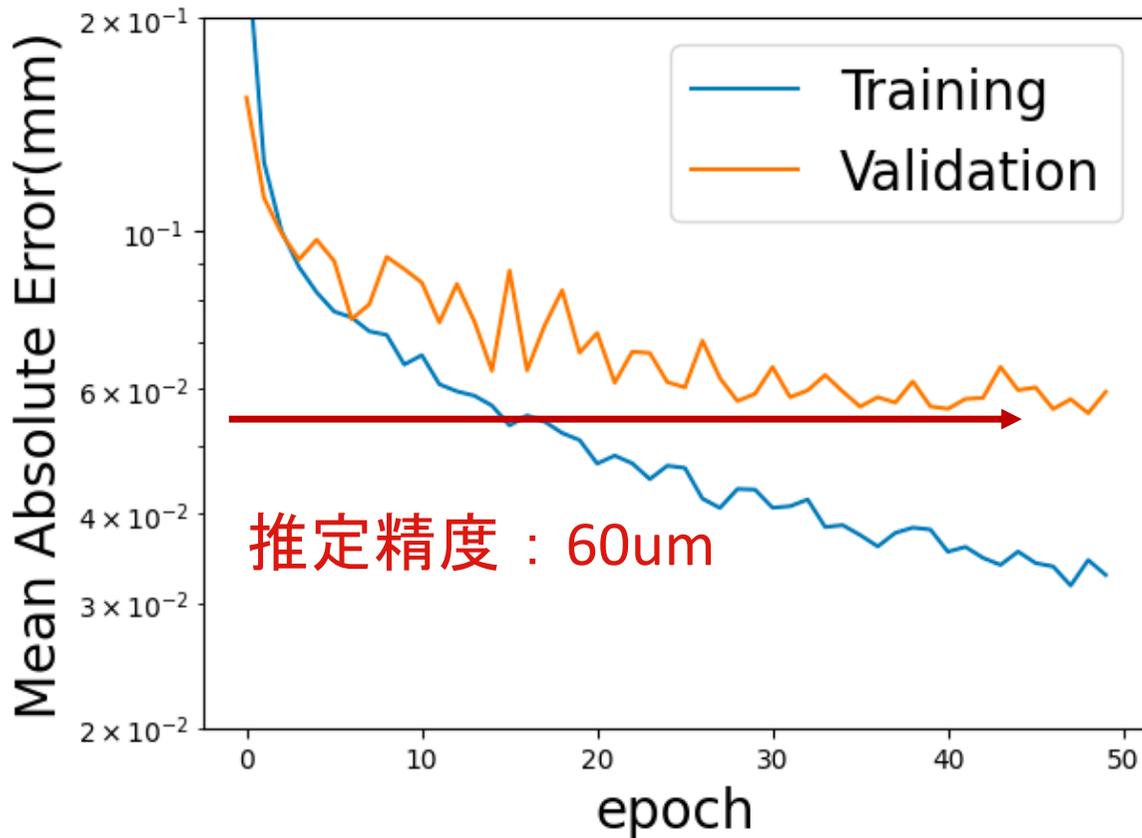
Layer (type)	Output Shape	params
Input	(64, 64, 5)	0
2D Convolution	(62, 62, 32)	1472
2D Convolution	(60, 60, 32)	9248
Max Pooling 2D	(30, 30, 32)	0
Flatten	(28800)	0
Dense	(256)	<u>7373056</u>
Dense	(64)	16448
Dense	(3)	195

莫大なパラメータ数

Alex-Net*: 画像認識において
高い画像特徴抽出の実績のある型



3. 学習後のモデルの予測精度の評価

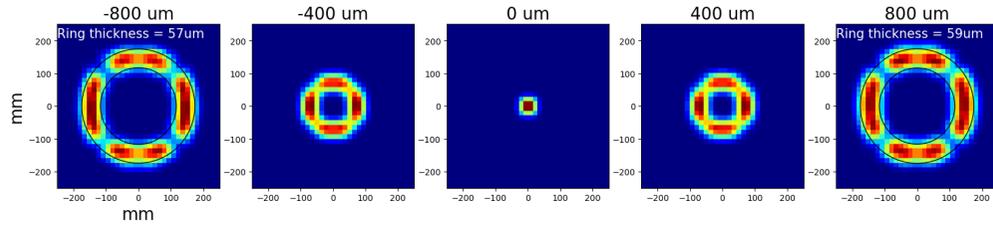


精度 : 真の答えとAI回答の差

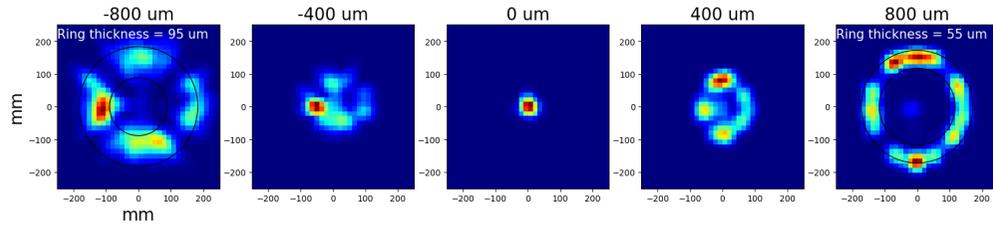
実用的な調整精度以上の精度で予測可能

PSFから、ミスアライメントの推定が可能であることを示した

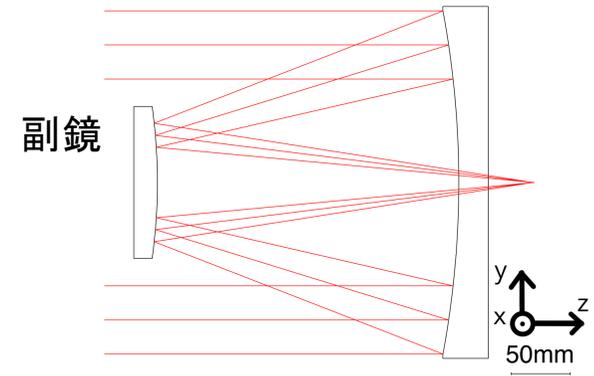
設計像



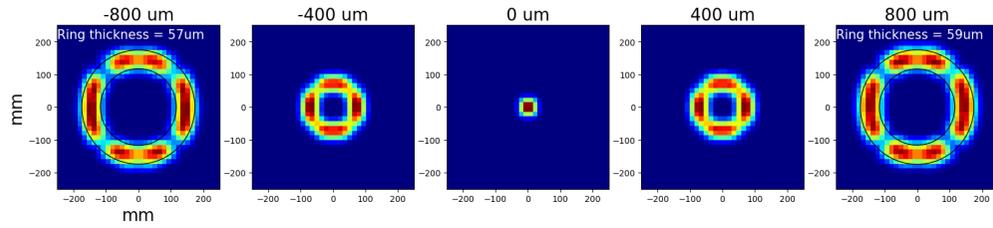
測定像



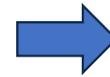
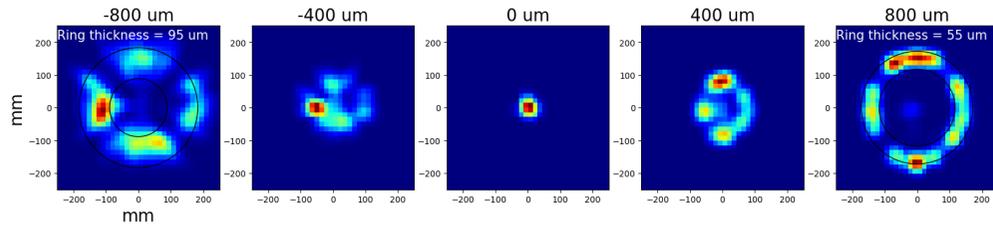
input



設計像



測定像

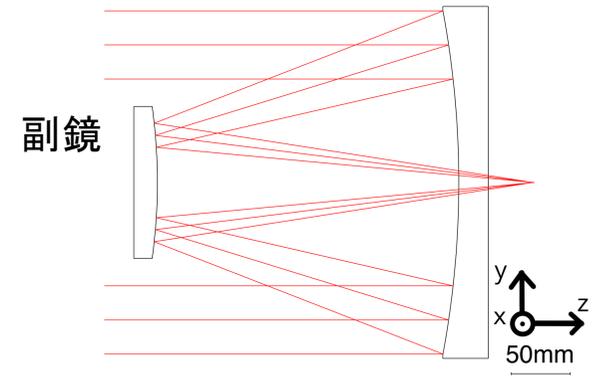


input



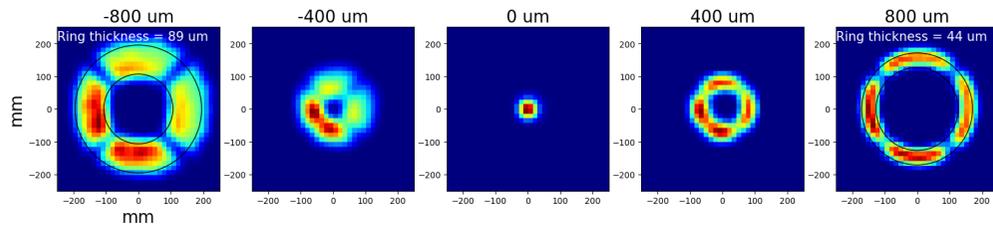
output

$x, y, z = 0.08, 0.14, -2.33$ mm



AI回答に合わせたミスアライメントでシミュレーション

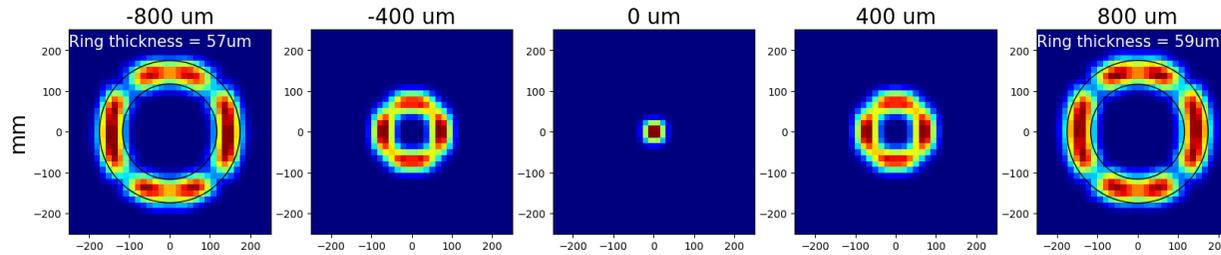
予測による像



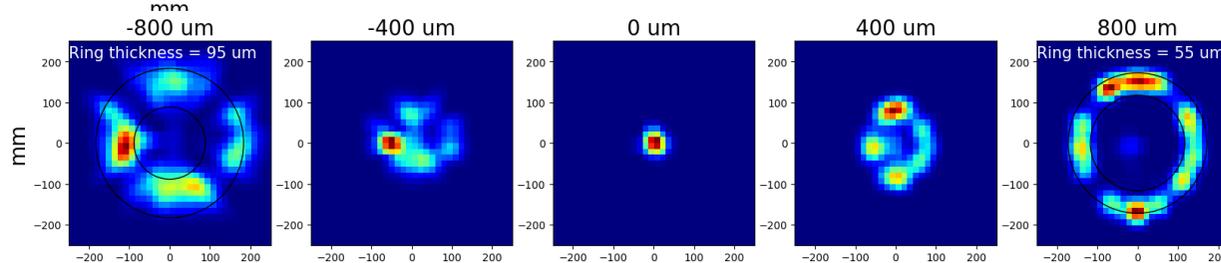
似てる!

AIの指示通り副鏡を調整し、再度測定

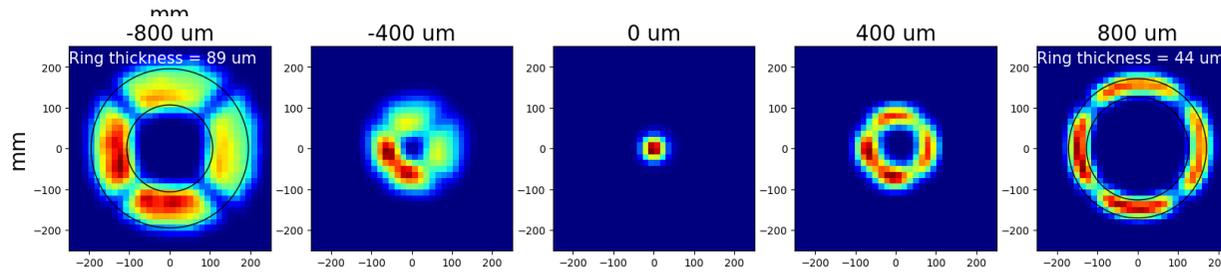
設計像



測定像

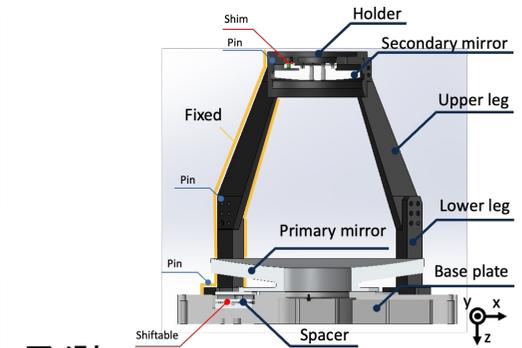
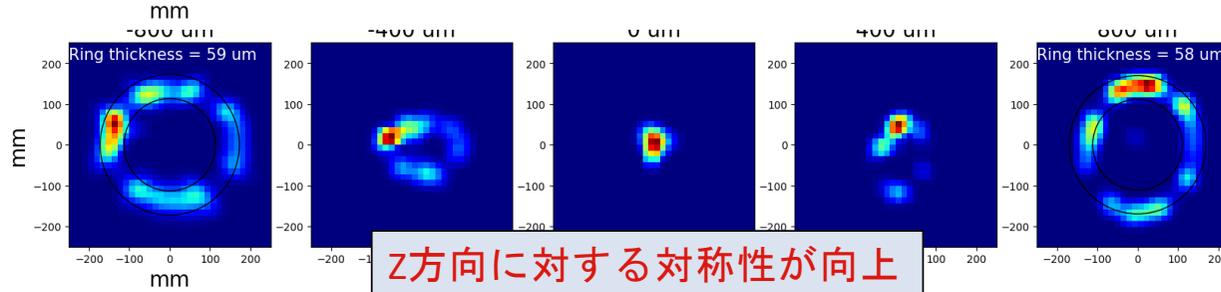


予測による像



調整後の測定像

z +2mm



予測

$x, y, z = 0.08, 0.14, -2.33 \text{ mm}$

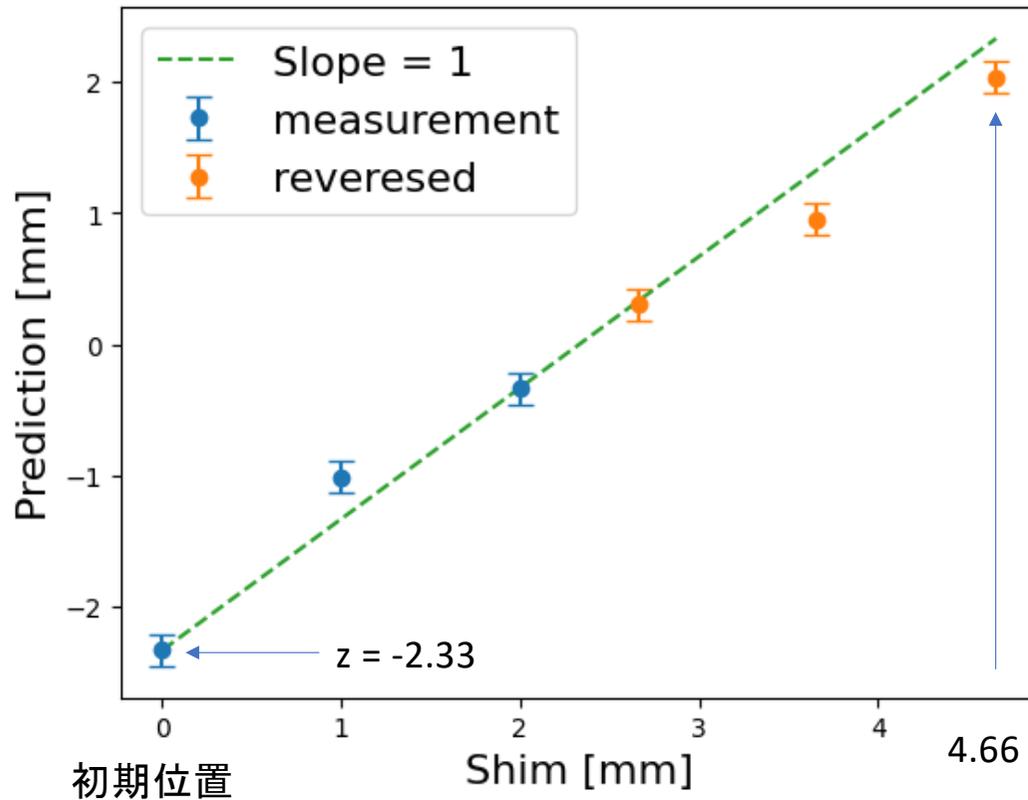
Z+2mm の調整

予測

$x, y, z = 0.09, -0.12, -0.34 \text{ mm}$

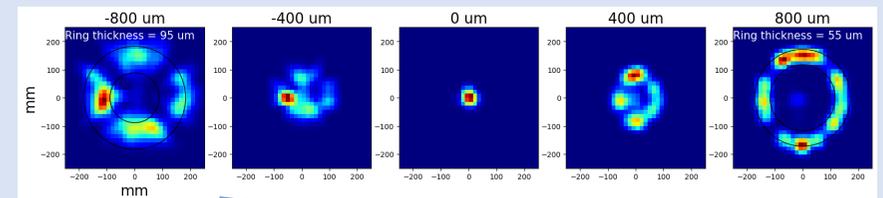
AI回答:+2.01mm
調整量に匹敵

繰り返し副鏡調整（シム）を行い、再現性を評価

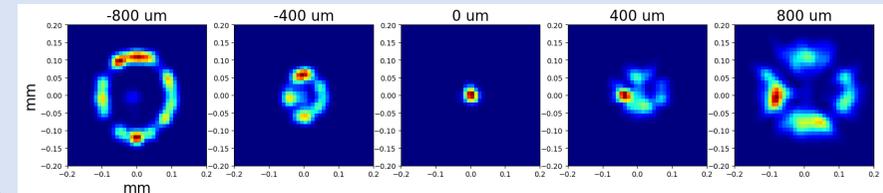


データ点を増やすため、
z方向の画像を反転させて
z+の画像を擬似的に作成して予測に変換

順方向画像



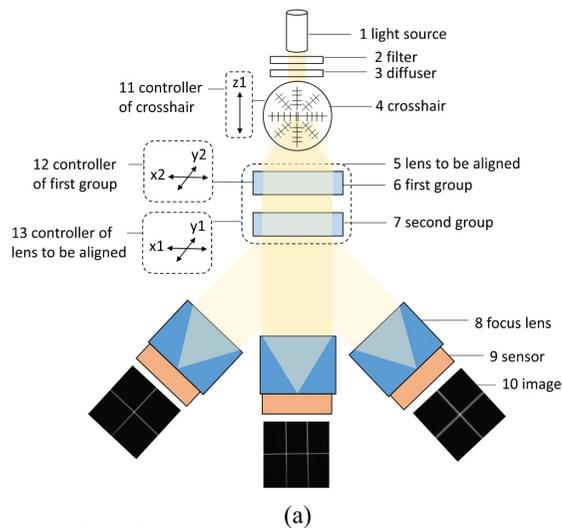
Reversed



実際の測定画像でも200 umの予測精度

複数視野から、ミスアライメントを自動で修正

AIによる定量的かつ迅速な予測を活用



Alignment system.

(a) Light path of the alignment system (multi-FoVs)

HAIBIN LIU et al, Application of deep learning in active alignment leads to high-efficiency and accurate camera lens assembly. Vol. 32, No. 25 / 2 Dec 2024 / Optics Express 43834

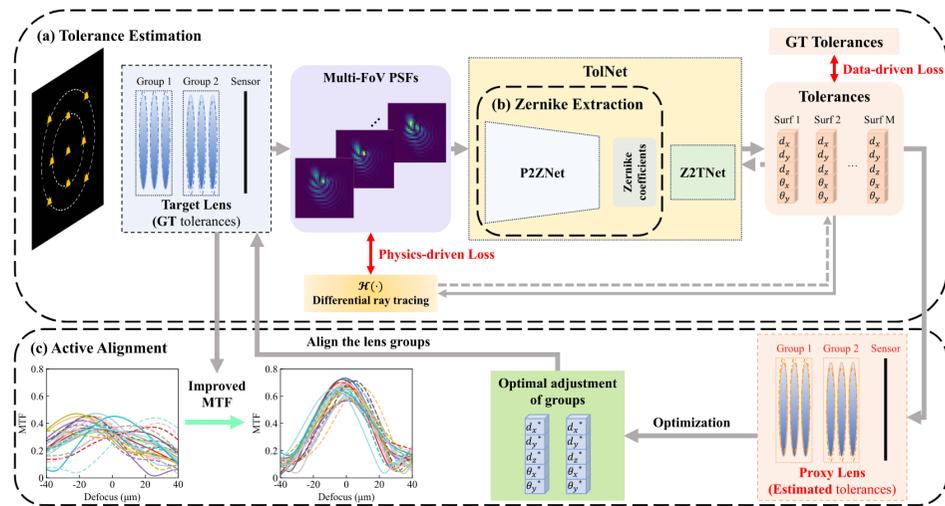
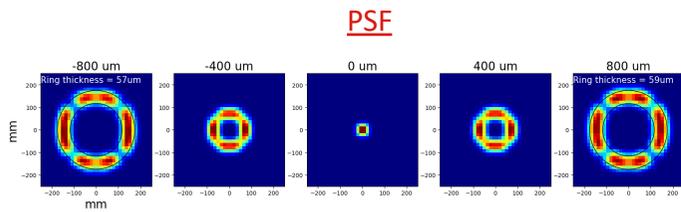


Fig. 1. Overview of our proposed active alignment pipeline leveraging physics-informed deep learning.

ENJIE HU et al, Fast and accurate active alignment of camera lenses with physics-informed deep learning
Vol. 33, No. 10 / 19 May 2025 / Optics Express 21256

レンズ量産や、宇宙での自動調整が可能に

PSFからミスマライメントを定量的に推定するモデルを開発

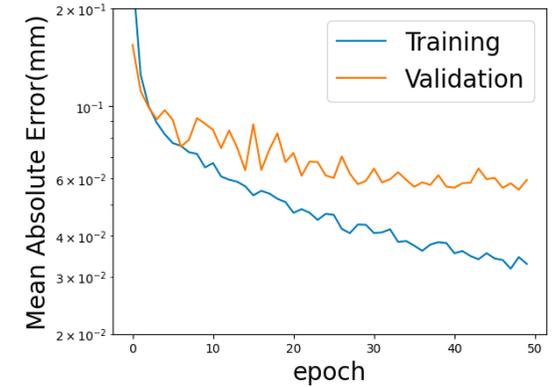


調整指示AI

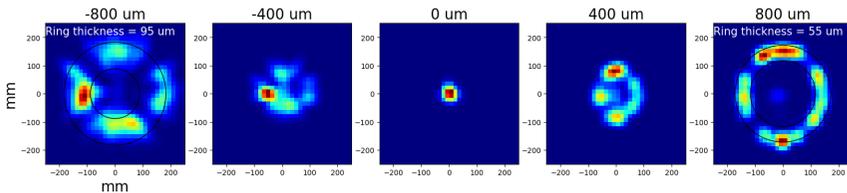


ミスマライメント

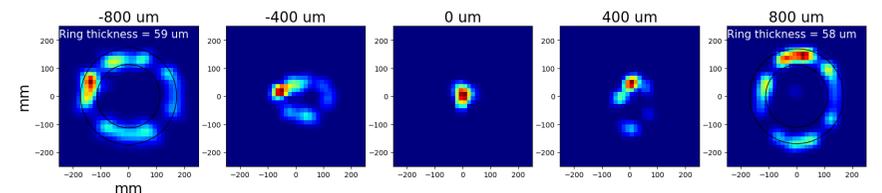
x mm ずれてます



実際の測定像からAIの指示通りに光学系を調整し、結像性能の向上を確認



予測
&
調整



インプット

任意の状態から200umの精度で調整可能