

# 光学観測による宇宙物体の動態推定に関する研究

## Study on Estimation of Space Object Behavior Using Optical Measurements

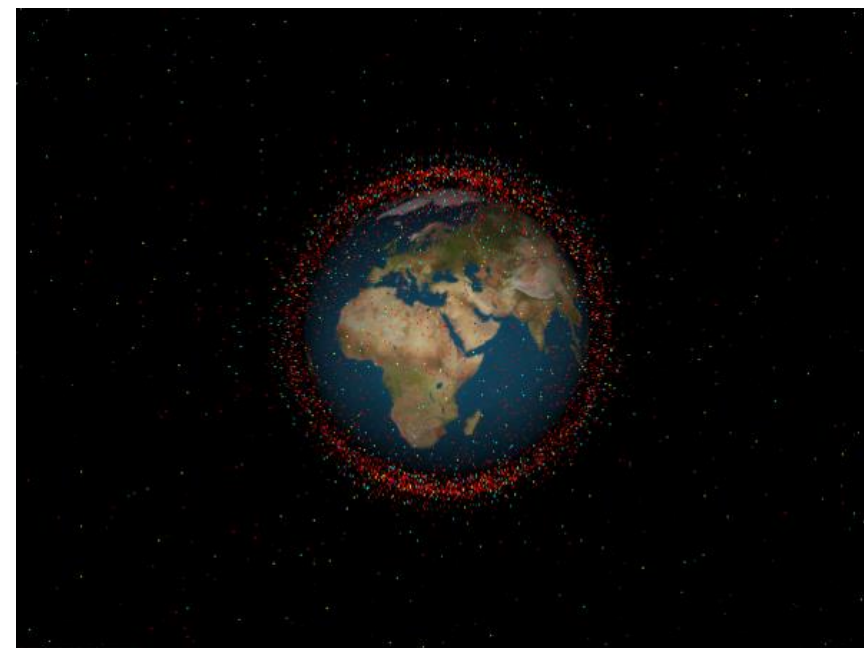
荒川稜平, 松下悠里, 吉村康広, 花田俊也

九州大学 工学府 航空宇宙工学部門  
宇宙機ダイナミクス研究室

# スペースデブリ問題

地球の周りには大小さまざまな“ごみ”が存在する

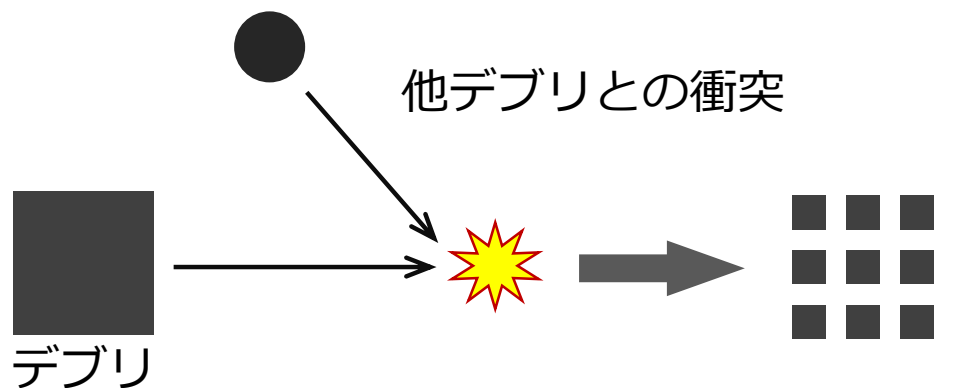
- 役目を終えた人工衛星
  - 使用済みのロケット上段
  - 断熱材、塗料の破片
- など



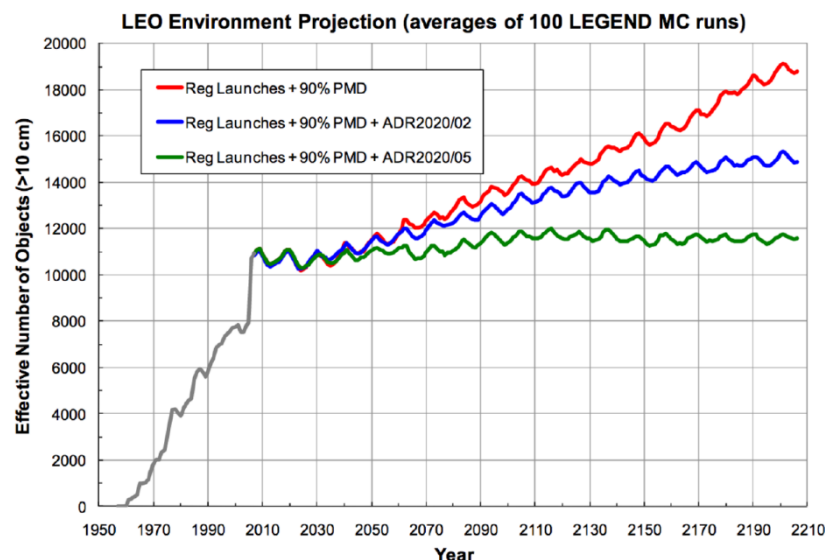
- 天体観測への悪影響
- 人工衛星との衝突リスク

# スペースデブリ問題

デブリ問題が深刻となる要因の一つに、デブリの自己増殖がある



デブリ同士の衝突や、使用済みロケットの爆発で新たなデブリが発生する



1つの大きなデブリを除去することは  
将来発生する可能性のある大量のデブリを抑制することにつながる

## ADR(Active Debris Removal) : 能動的デブリ除去

デブリの増加を抑えるために、様々なADR衛星が提案されている

- アームや網による捕獲
- 鋸を突き刺して捕獲
- 減速用デバイスを取り付け

効率的なデブリ除去のためには  
➡ デブリの形状・姿勢を事前に把握する必要がある  
(デブリの動態推定)

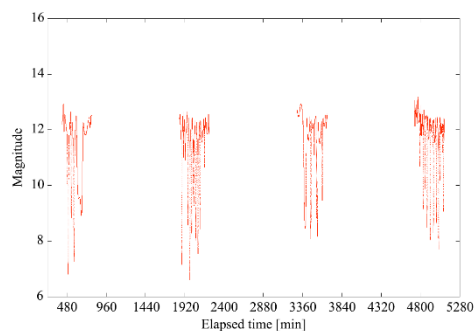
デブリの動態推定にTomo-e Gozenの  
観測データを活かさないか？

## 手法

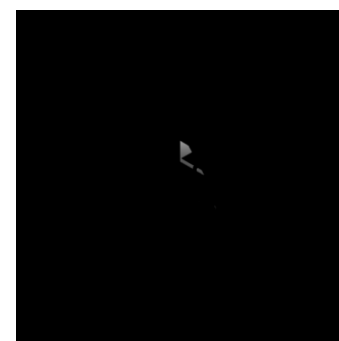
- 分光観測
- 偏光観測
- 測光観測
- 撮像観測

## 対象

- 組成
- 形状
- 表面特性
- 姿勢運動



デブリの等級変化



姿勢運動・形状など

人工物であるため、形状や表面特性が短い期間で変化する

- 破損による形状の変化
- 表面特性の変化



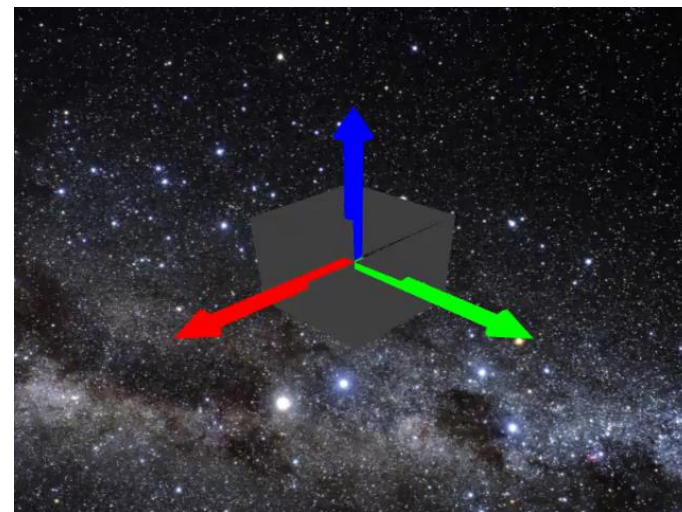
形状などが打ち上げ時とは異なる可能性も

様々な外乱トルクを受けて複雑な姿勢運動を行う

- 太陽光による輻射圧トルク
- 大気抵抗によるトルク
- 重力傾斜トルク
- 地磁気によるトルク



角速度・回転軸が複雑に変化

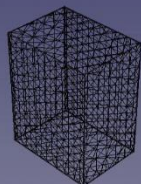


姿勢運動の一例  
(シミュレーション)

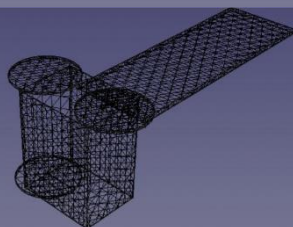
# 姿勢と形状の同時推定

↓形状の候補

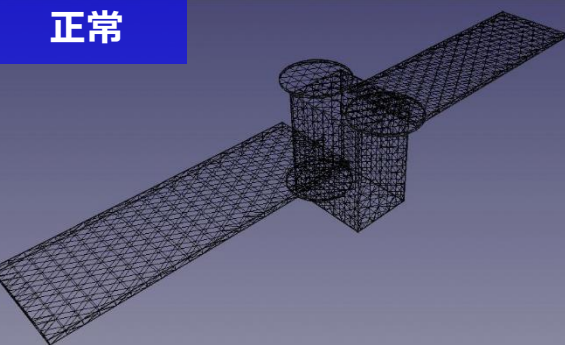
バスのみ



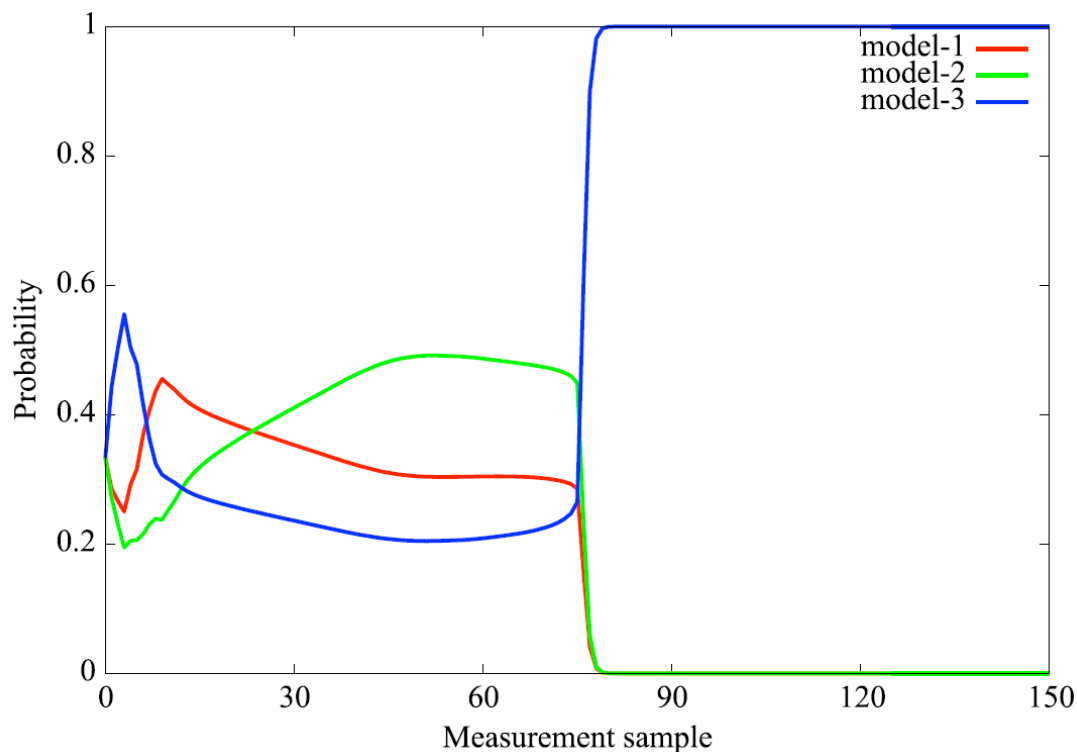
欠損



正常

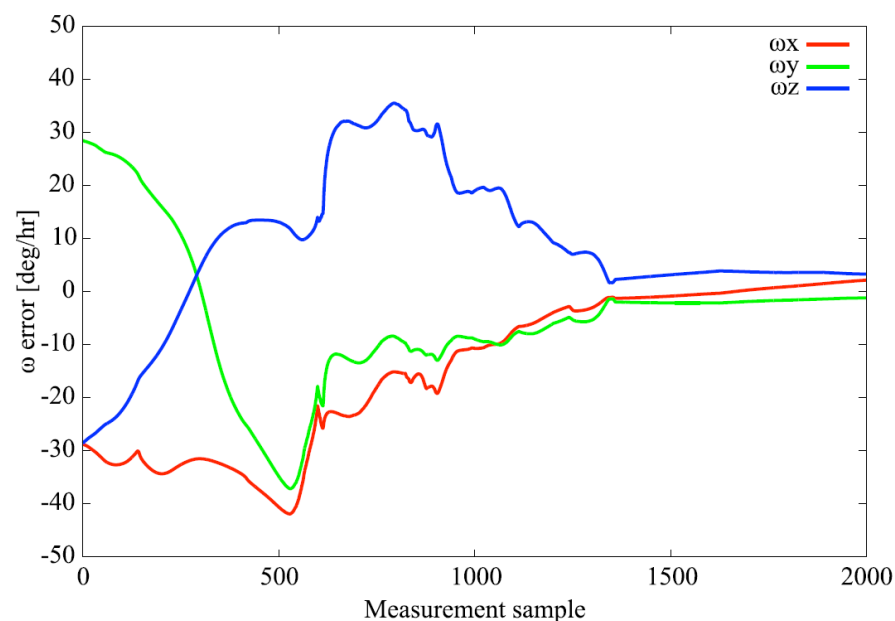
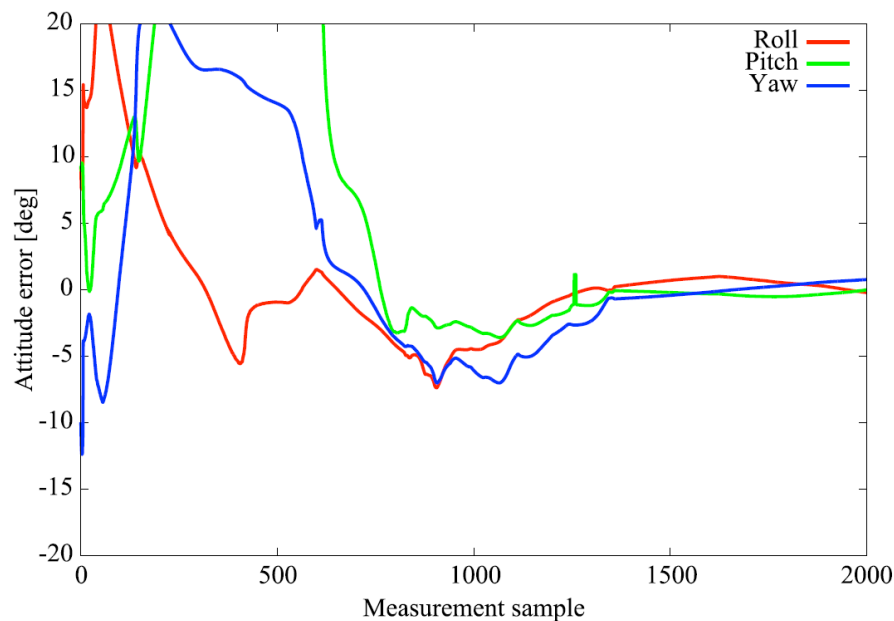


衛星が元の形を保っていない可能性があるとき  
考えられる形状としていくつかの候補をモデル  
として与えておき、最も確からしい形状を推定



# 姿勢と形状の同時推定

形状を推定するのと同時に、姿勢（角度・角速度）も推定

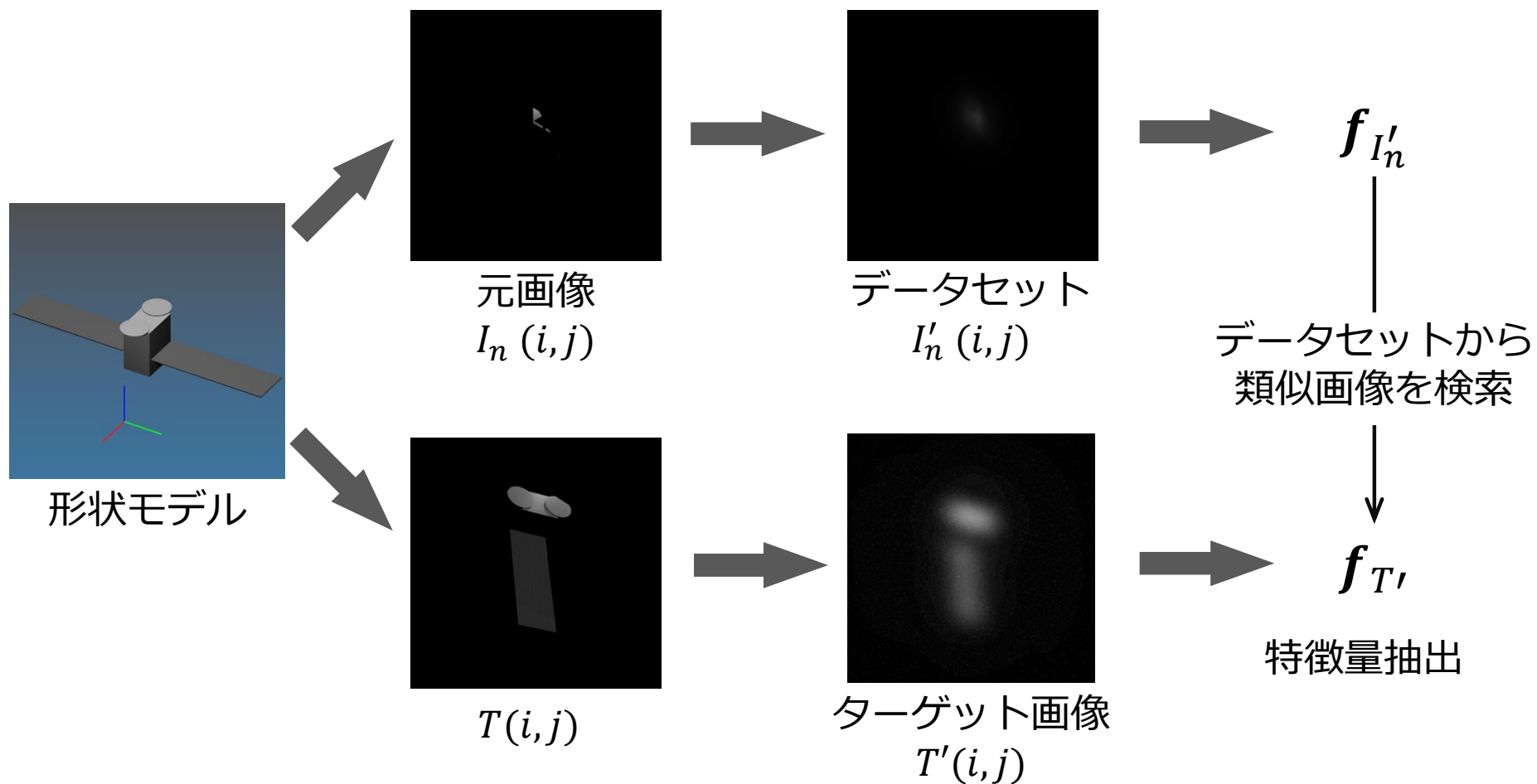


それぞれ誤差が  $0^\circ$  に収束

ただし、この手法での推定には角度・角速度の初期値が必要



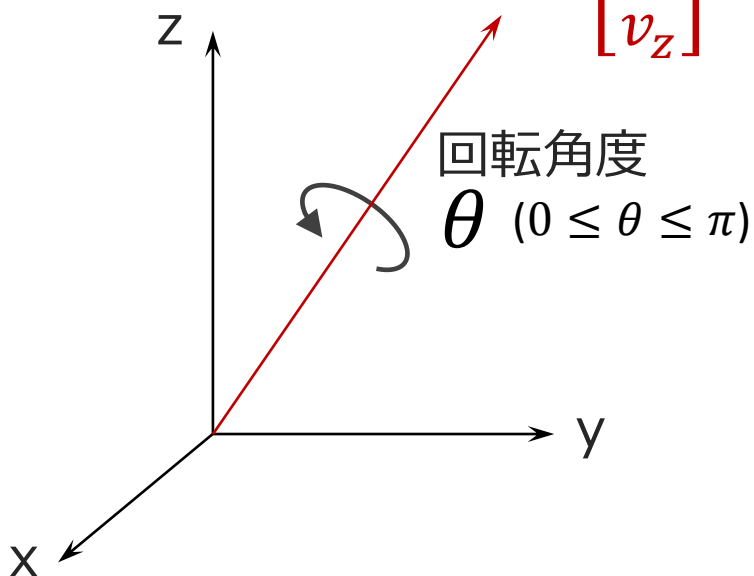
ライトカーブによる姿勢推定の初期値として撮像画像による姿勢推定を利用



推定誤差をより正確に評価するために、  
クォータニオンを使用して姿勢角を表現

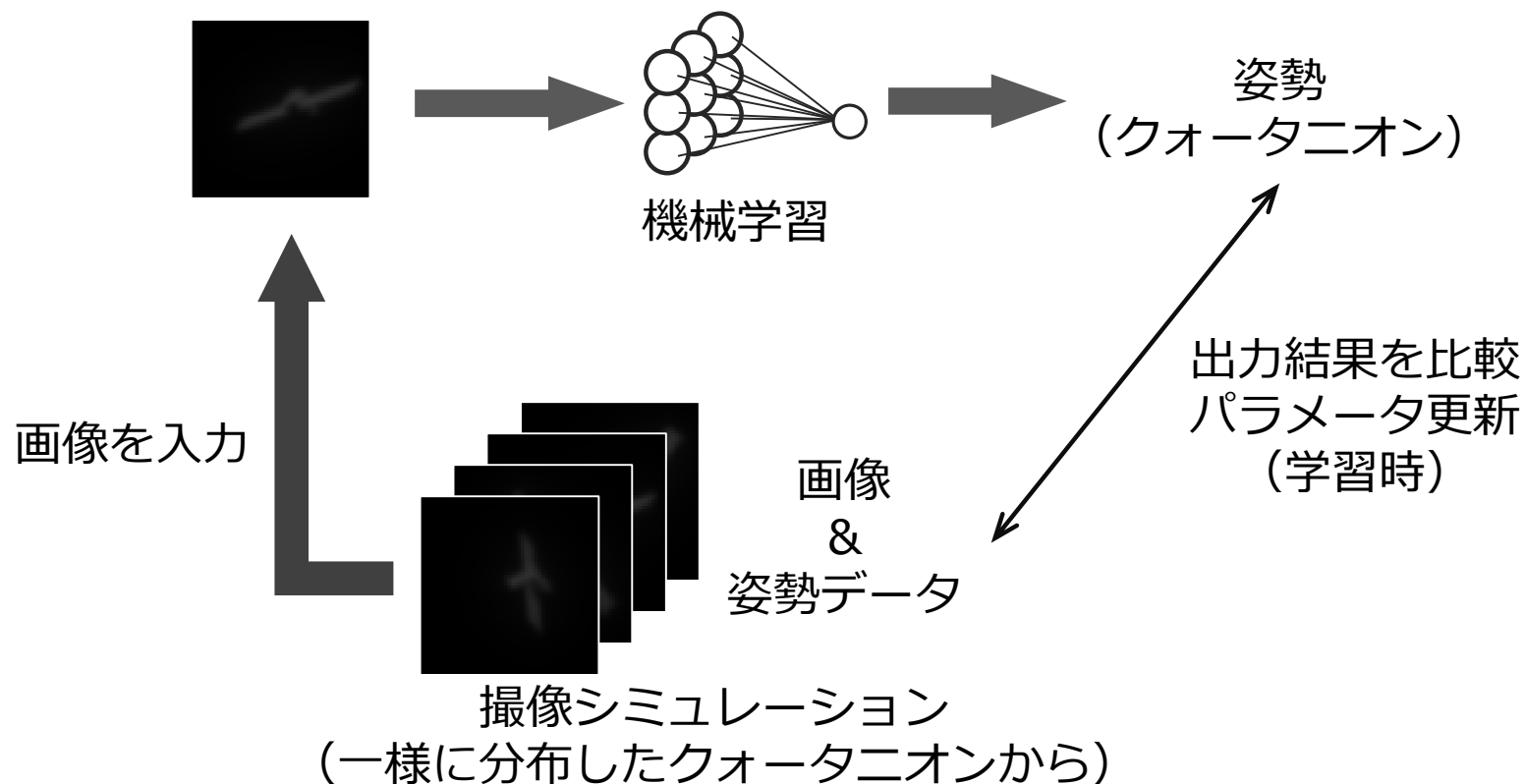
1つの回転軸と回転角度を用いて、3次元的な回転を表現できる

回転軸： $\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}$  (単位ベクトル)

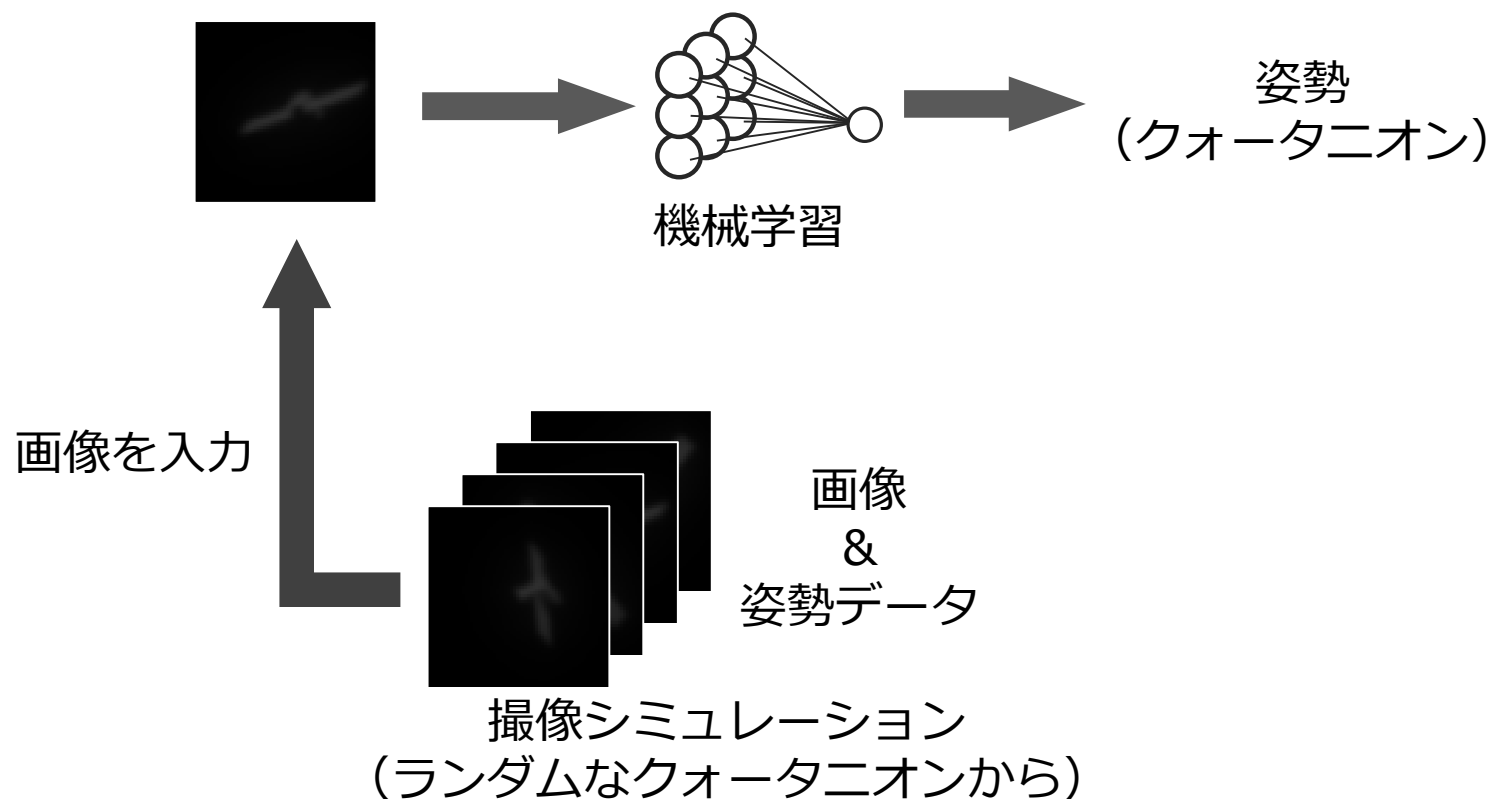


クォータニオンは  $\tilde{q} = \begin{bmatrix} v_x \sin \frac{\theta}{2} \\ v_y \sin \frac{\theta}{2} \\ v_z \sin \frac{\theta}{2} \\ \cos \frac{\theta}{2} \end{bmatrix}$   
と定義される

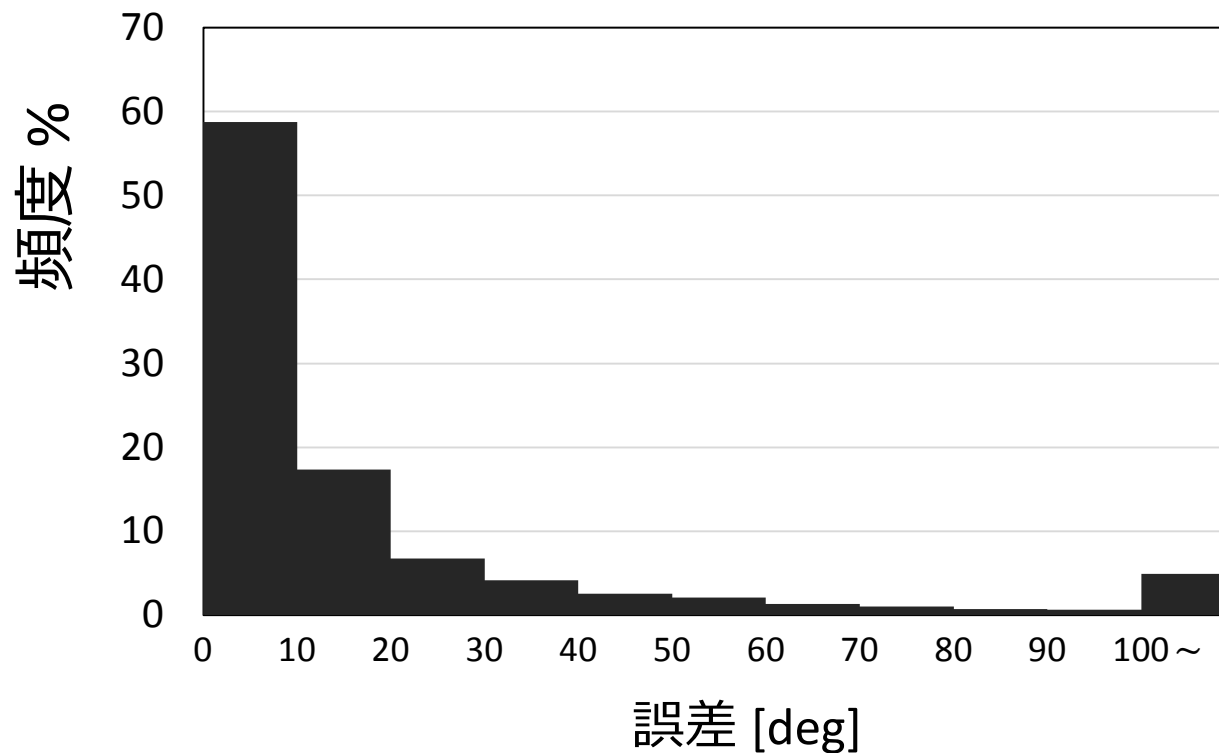
推定精度の向上とロバスト性の改善のために機械学習を適用



推定精度の向上とロバスト性の改善のために機械学習を適用



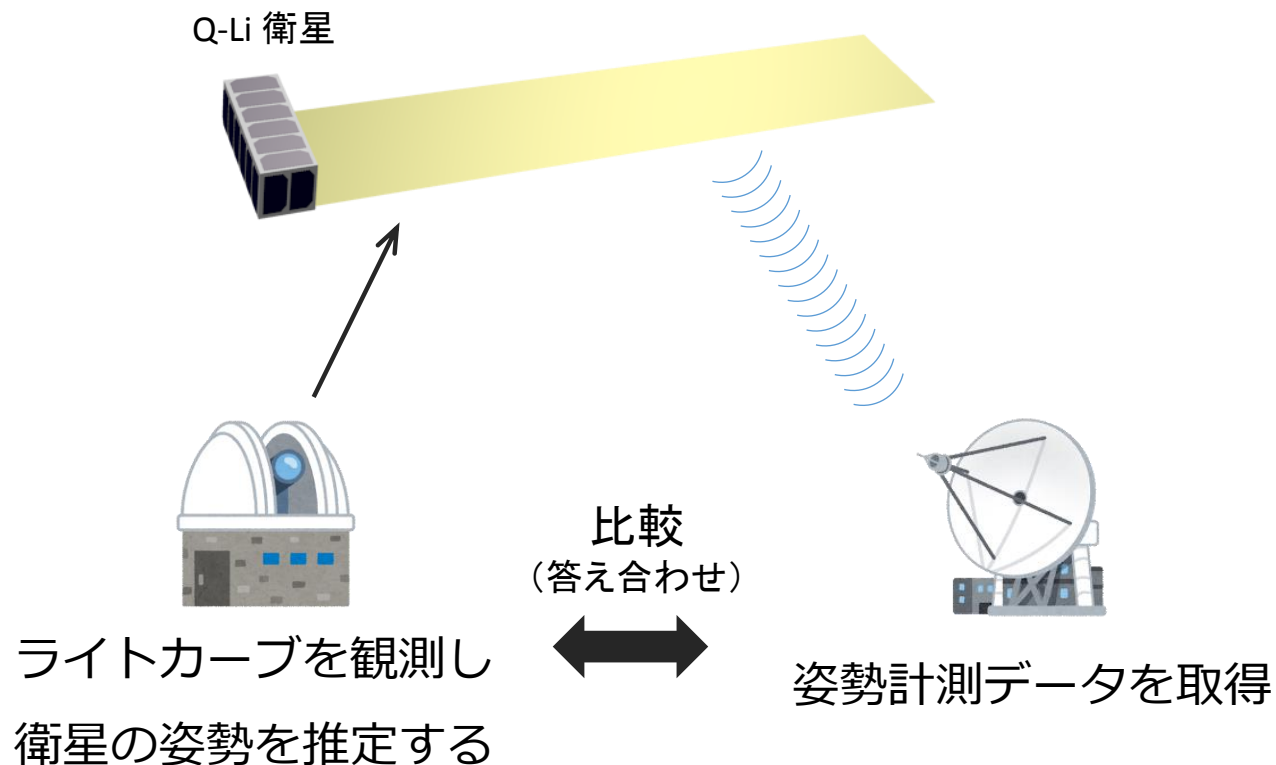
## 学習結果 テスト用データに対する誤差の分布



モデルの改善により、推定精度の平均は向上したが  
大きな誤差が生じる推定に適さない画像が多く存在する

# 実証に向けての活動

## ライトカーブインバージョン実証衛星 Q-Li



- デブリの形状や姿勢運動を把握することは効率的なデブリ除去につながる
- Tomo-e Gozen の観測データに写りこんだデブリの情報をデブリの動態推定に活用できるかもしれない