

ConvLSTMを用いた スペースデブリと人工衛星の識別

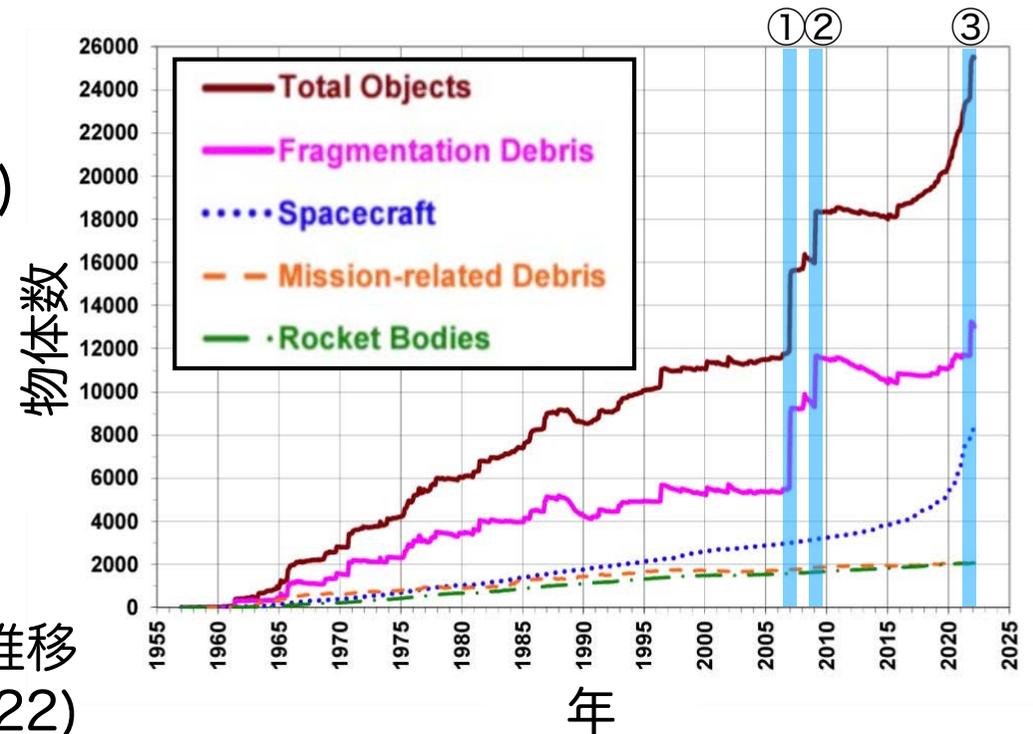
大井 渚 (北海道情報大学)

千葉慎一郎、長尾光悦

スペースデブリ

- スペースデブリ：使用済みロケット部品や故障した人工衛星等
- デブリ同士や衛星との衝突により、多量の破片が発生し、デブリが更に増加

- ① 衛星破壊実験 (中, 2007)
- ② 衛星(米)とデブリ(露)の衝突 (2009)
- ③ 衛星破壊実験 (露, 2021)

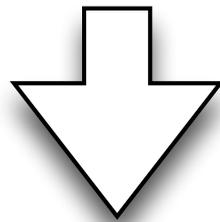


カタログされた物体数推移
(H. Cowardin 2022)

デブリの数や軌道情報を正確に把握し、運用上の
リスクを適切に評価することが不可欠

デブリカタログ

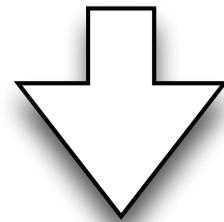
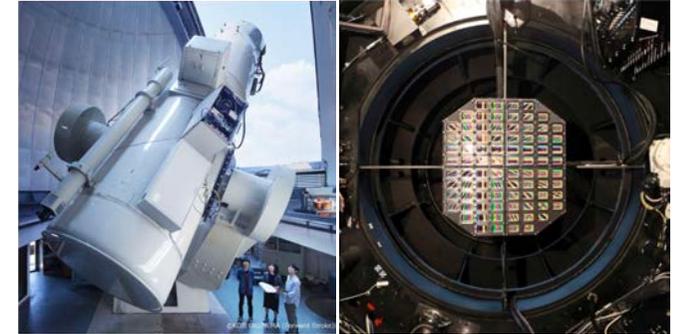
- 一定以上の大きさのデブリ情報は、地上からの観測により、カタログに登録され継続的に追跡 (ex. Space-Track.org)
- しかし、カタログ化されていないデブリも多数存在
 - 小さすぎて検出困難 (通常約10cm未満は難しい)
 - **単一観測**では軌道決定が難しく追跡困難
 - 観測頻度や視野の限界により、未検出デブリの存在も多い
- さらに、検出された物体の正体がいかなければ、適切な対策や運用が困難



動画データからデブリの識別を目指す

トモエゴゼン

- トモエゴゼン：木曾105cmシュミット望遠鏡に搭載された可視光の広視野動画観測システム
 - CMOSセンサ84枚：20平方度の広視野
 - 2フレーム/秒で9秒間、計18枚の連続静止画(=動画)を取得
- トモエゴゼンによるデブリ識別のメリット：
 - 広視野により、未検出のデブリも捉えられる可能性
 - 動画から移動軌跡を抽出することで、検出精度が上がる可能性
 - 時系列画像による軌跡パターン解析で、識別精度向上に繋がる可能性



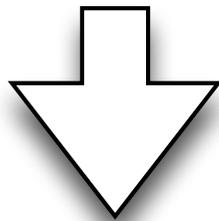
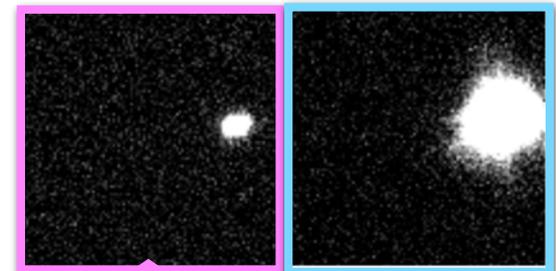
トモエゴゼン動画データを機械に学習させる

データ

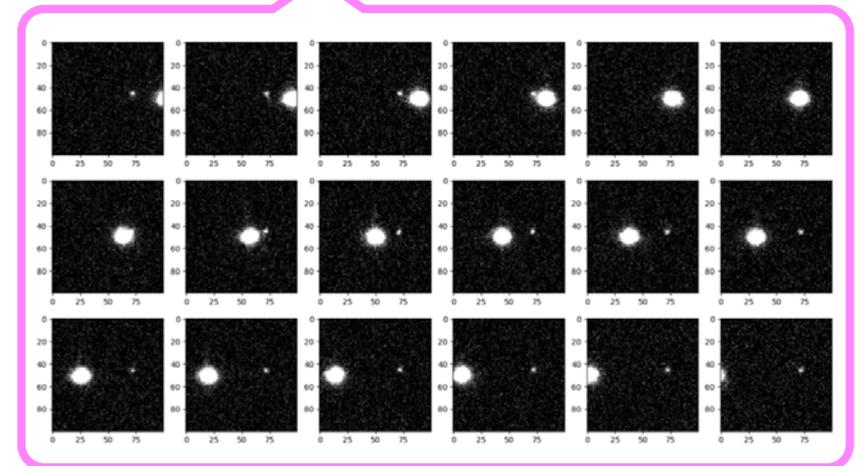
- データ：2023年4月9日にトモエゴゼンで撮影された動画データ
 - 18枚の時系列静止画データに分解し使用
- ラベル：Space-Track.org※にあるTypeを使用
 - **PAYLOAD**：人工衛星
 - **ROCKET BODY**・**DEBRIS**：デブリ
- 両者の位置情報から、データにラベル付け

※米国宇宙軍が運営する人工衛星や宇宙デブリの軌道データを提供する公式サイト

デブリ例 人工衛星例



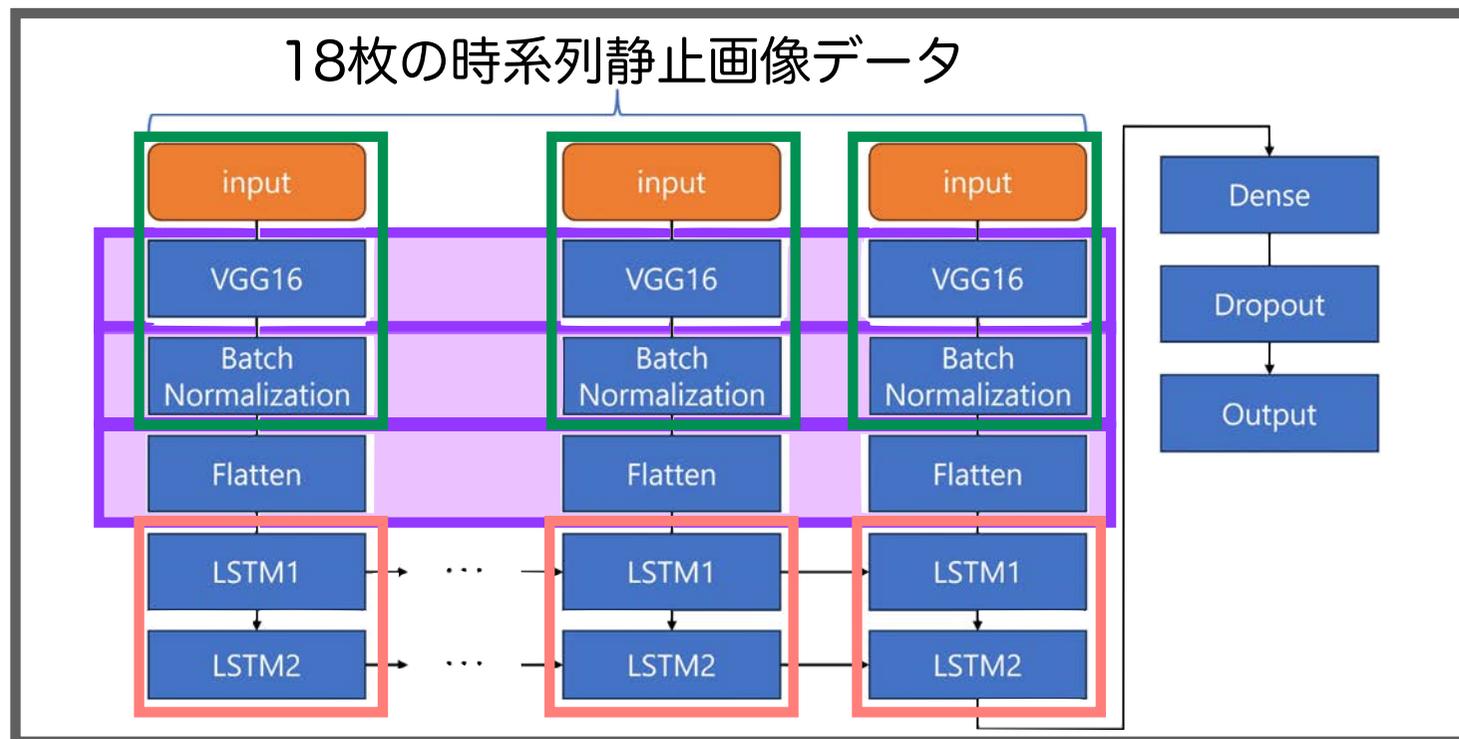
デブリ：294個
人工衛星：308個



18枚の時系列静止画像データ例

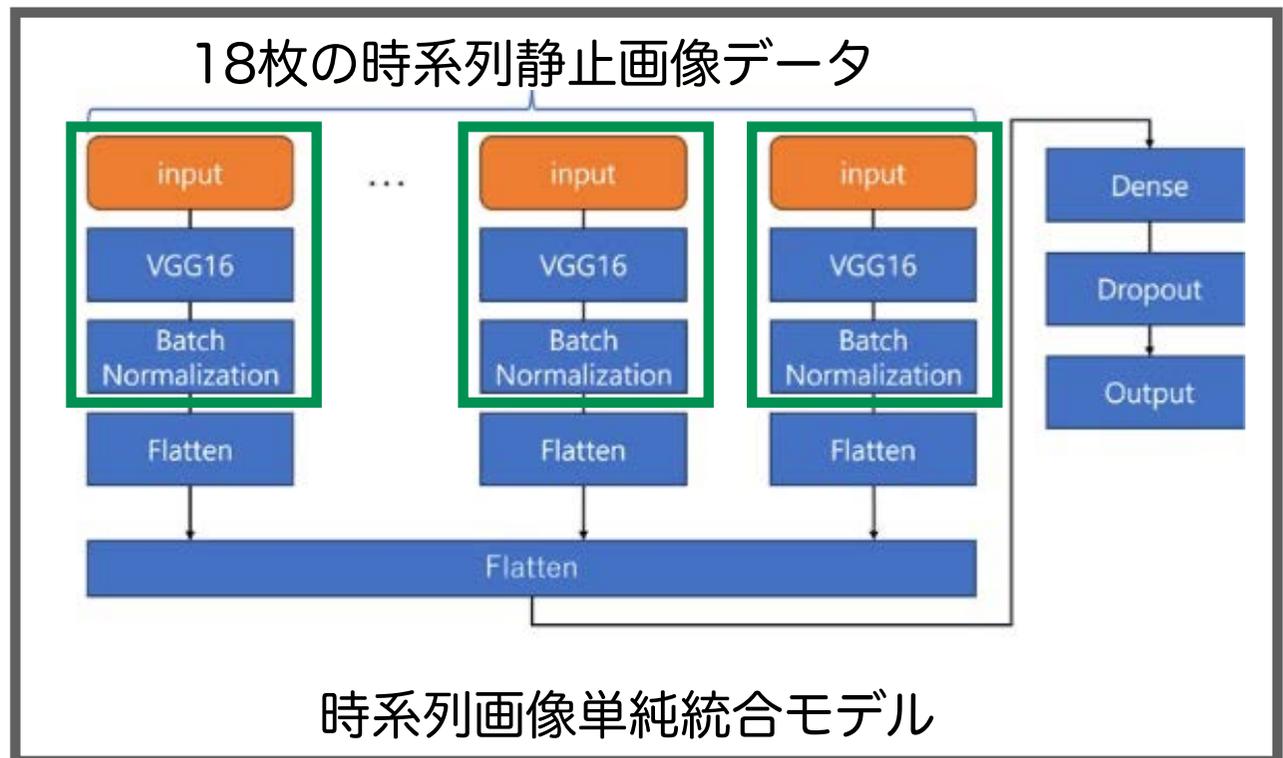
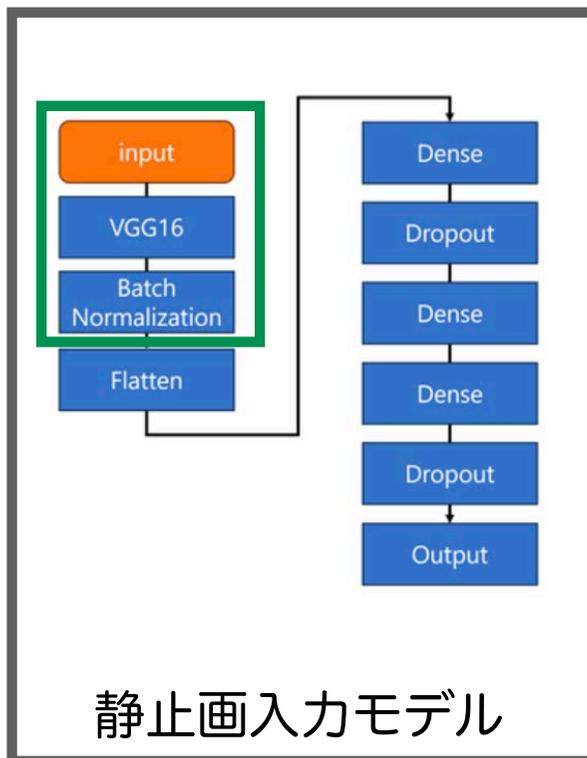
モデル

- ConvLSTM(CNN + LSTM)を用いた識別
 - CNN (Convolutional Neural Network) :
画像の空間的特徴を抽出するために用いられる深層学習モデル
 - LSTM (Long Short-Term Memory) :
時系列データの時間的な依存関係を学習できる深層学習モデル→ 時系列画像データの「空間情報」と「時間情報」を同時に扱える
- 各時間ステップで同じ処理を行うため、Time Distributedレイヤー適用



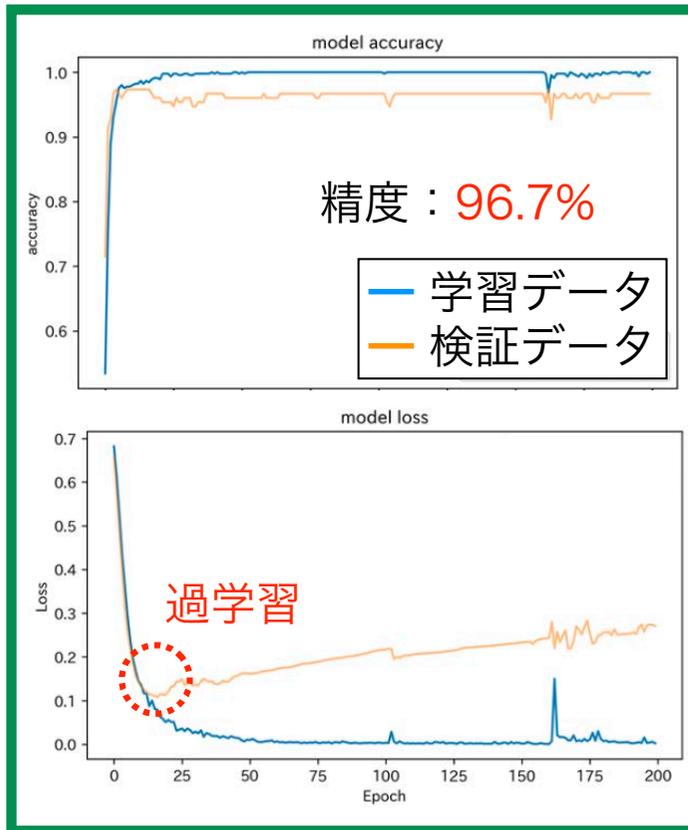
比較モデル

- 比較として、時系列情報を使わないモデルを2つ
 - ・ 静止画入力モデル：1枚の静止画像で分類。時系列情報は考慮しない
 - ・ 時系列画像単純統合モデル：18枚の連続画像を個別に処理し、特徴をまとめて分類。時系列の順序や依存関係は無視。

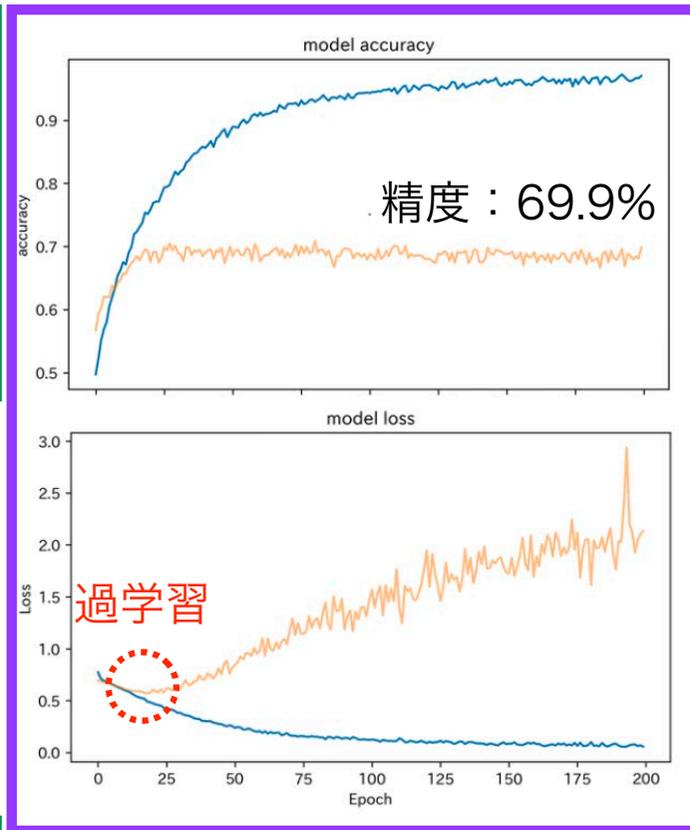


結果

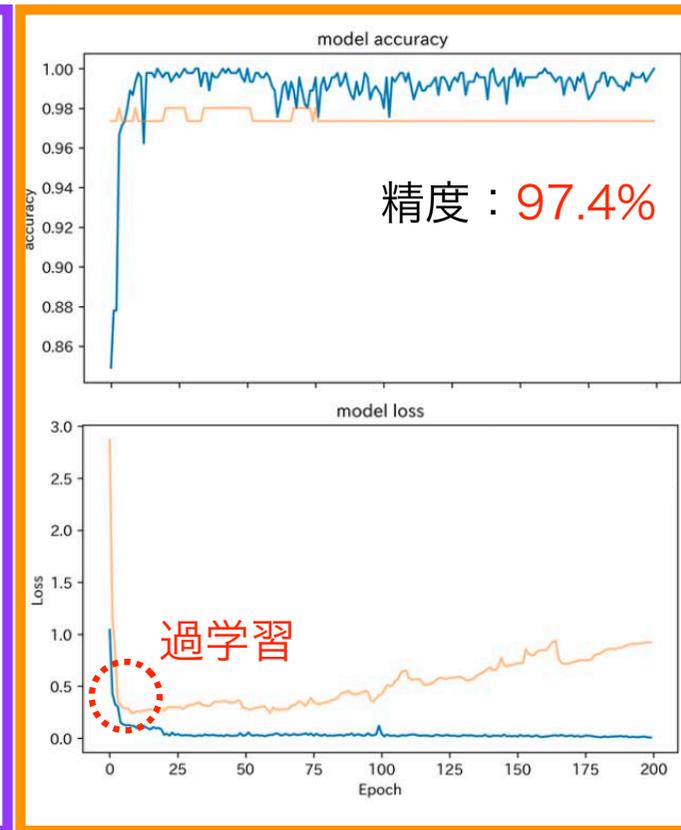
ConvLSTM



VGG16(CNN)+静止画



VGG16(CNN)+動画



モデル

精度

ConvLSTM

96.7%

VGG16+静止画

69.9%

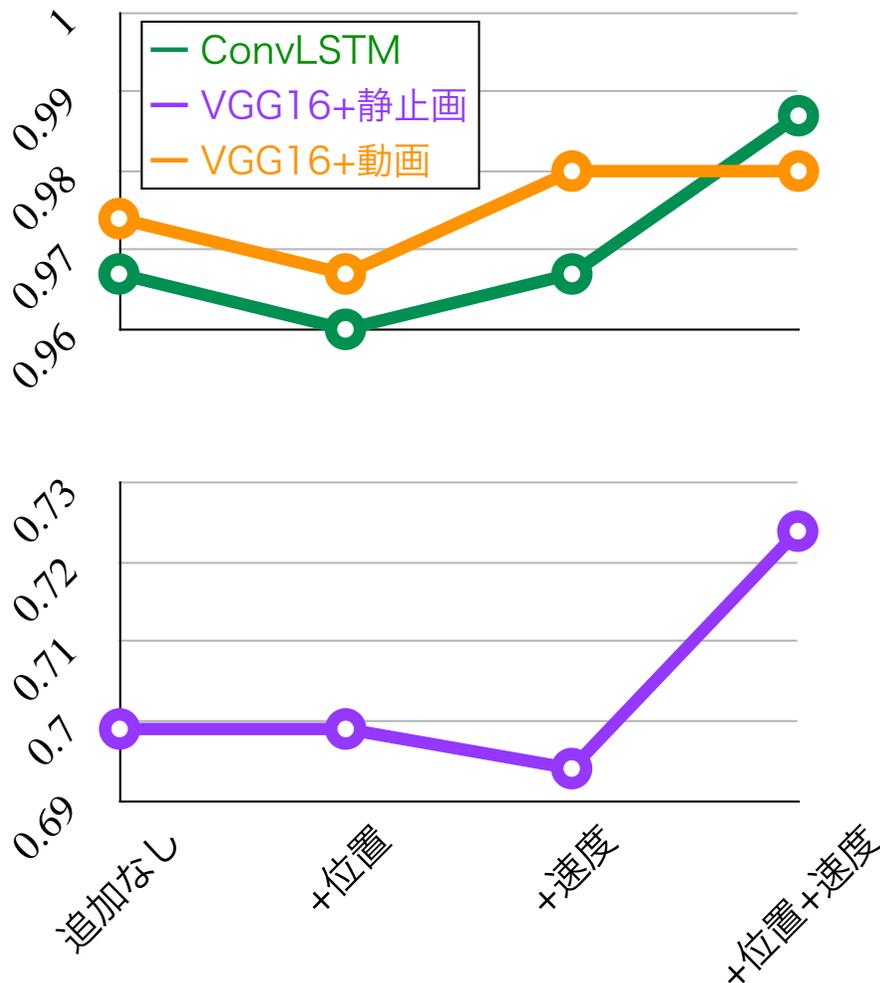
VGG16+動画

97.4%

- 静止画像は、デブリ識別するのに不十分
- 連続静止画像さえあれば、「時系列データ」として扱わずとも、識別に必要な情報は保持している
- 今回の時系列静止画像は、ConvLSTMを使うには単純すぎ

入力情報の追加

- 多様な入力情報により、ConvLSTMの強みがより活かされる可能性
→ 画像データに加えて「位置情報」と「速度情報」を入力



| モデル | 追加なし | +位置 | +速度 | +位置,速度 |
|-----------|-------|-------|-------|--------|
| ConvLSTM | 96.7% | 96.0% | 96.7% | 98.7% |
| VGG16+静止画 | 69.9% | 69.9% | 69.4% | 72.4% |
| VGG16+動画 | 97.4% | 96.7% | 98.0% | 98.0% |

- 「位置情報」や「速度情報」のどちらか一方を追加しても、大きな変化ない
 - 両方を同時に追加した場合、全てのモデルで識別精度が向上した
- 識別において画像以外の情報が重要な補助要素となりうる

今後は、識別の根拠を可視化するなどして、識別の要因を検証する必要あり

まとめ

- トモエゴゼンの動画 (=時系列静止画像) データと機械学習を用いて、宇宙デブリと人工衛星の識別を試みた。
 - 両者の識別が動画データから可能であることを確認した。
 - 移動天体の「位置情報」と「速度情報」を同時に入力することで、識別精度が向上することを確認した
- ただし、識別モデルが動画データのどの情報を重視して判断しているかはブラックボックスであり、不明である
 - 今後は識別の根拠を可視化するなどによって、モデルがどの特徴に着目しているかを検証する必要がある
- 過学習もあるため、「学習データの拡充」や「モデル構造の改善」などの対応が必要である

