

2023 年度卒業

修士論文

深層学習による動画予測手法を用いた太陽全球紫外線像の
時系列予測

Time-Series Prediction of Full-Disk Solar Ultraviolet Images Using
Deep Learning-based Video Prediction Method

所属	新潟大学 大学院自然科学研究科 電気情報工学専攻 情報工学コース 飯田研究室
氏名	佐々木明良
学籍番号	F22C017D

概要

目次

第 1 章	研究背景	5
第 2 章	動画予測	6
2.1	動画予測のための基礎技術	6
2.1.1	Convolutional Neural Network (CNN)	6
2.1.2	Encoder-Decoder	6
2.1.3	Long Short Term Memory (LSTM)	6
2.1.4	Attention	6
2.2	動画予測フレームワーク	6
2.2.1	ConvLSTM	6
2.2.2	PredRNN	6
2.2.3	Motion Aware Unit	6
第 3 章	データ	7
3.1	SDO / AIA	7
3.1.1	AIA 211 Å	7
3.1.2	AIA 193 Å	8
3.1.3	AIA 171 Å	8
3.2	前処理	8
3.2.1	不正な画像の除去	9
3.2.2	スケーリングと正規化	11
3.2.3	データセットの分割	11
第 4 章	Motion Aware Unit を用いた 1 波長を入力とした紫外線像の全球時系列予測	12
4.1	実験概要	12
4.2	学習の推移	13
4.3	実験結果	13
4.3.1	全球での評価	13
4.3.2	経度依存性の評価	13

4.3.3	東側リムから出現する活動領域に対する視覚的評価	13
4.4	考察	13
第 5 章 Motion Aware Unit を用いた 3 波長を入力とした紫外線像の全球時系列予測		14
5.1	実験概要	14
5.2	学習の推移	15
5.3	実験結果	15
5.3.1	全球での評価	15
5.3.2	経度依存性の評価	15
5.3.3	東側リムから出現する活動領域に対する視覚的評価	15
5.4	考察	15
第 6 章 まとめ		16
参考文献		17

第1章

研究背景

宇宙天気の地球に対する影響
宇宙天気の攪乱の原因となる太陽活動
太陽活動の観測と宇宙天気予報
宇宙天気予報における紫外線画像の利用と重要性
紫外線像を利用した宇宙天気予報モデルの先行研究
研究目的: 数日後の紫外線画像を予測し生成する近年の動画予測モデルの登場と発展
本研究で用いる動画予測モデルの概要

宇宙天気とは、太陽活動に起因する宇宙環境の現象を指し、激しい宇宙天気の変動は地球上の電力網や衛星通信など、人間の技術システムに影響を及ぼすことがある。太陽の表面や大気における物理現象、特に太陽フレアやコロナ質量放出（CME）などの爆発的なイベントは、地球に到達する高エネルギー粒子や放射線の量を増加させ、宇宙天気の変動に大きな影響を与えることが知られている。そのため、太陽活動を観測し、宇宙天気を予測することは、人間の技術システムを宇宙天気の影響から守るために重要な課題である。

宇宙天気の予報には、太陽フレアの爆発や CME の発生を予測するものや、太陽風の地球到達時刻や強度を予測するものなどがある。これらの予測は、様々な観測機器によって得られる太陽観測データを用いて行われるが、紫外線像はその中でも重要な情報源の一つである。（DeFN、WindNet の話とか）

第 2 章

動画予測

2.1 動画予測のための基礎技術

2.1.1 Convolutional Neural Network (CNN)

2.1.2 Encoder-Decoder

2.1.3 Long Short Term Memory (LSTM)

2.1.4 Attention

2.2 動画予測フレームワーク

2.2.1 ConvLSTM

2.2.2 PredRNN

2.2.3 Motion Aware Unit

第3章

データ

3.1 SDO / AIA

モデルの学習及び評価データとして、NASA の Solar Dynamic Observatory(SDO)[1] の Atmospheric Imaging Assembly(AIA)[2] で撮影された紫外線観測データを用いた。

SDO は NASA の Living With a Star (LWS) プログラムの一つとして 2010 年 2 月に打ち上げられた太陽観測衛星である。AIA、Helioseismic and Magnetic Imager(HMI)、Extreme Ultraviolet Variability Experiment(EVE) などの高い空間解像度、時間分解能を持つ観測機器を搭載している。その観測データを用いることにより、太陽物理学、宇宙天気、また地球環境に関する理解や洞察を深めることができると期待されている。AIA は主に太陽大気を観測する観測機器であり、4 つの望遠鏡で構成されている。4096 × 4096、約 1.5 秒角の空間解像度をもち、12 秒ごとに太陽全球の画像を観測している。また、7 つの極紫外線フィルターと、2 つの紫外線フィルター、および 1 つの可視光フィルターを持ち、広範な温度帯で太陽大気を観察することを可能にしている。

これらのデータは Joint Science Operations Center(JSOC) によって提供されており、Python の太陽物理学を支援するライブラリである Sunpy を用いてダウンロードすることができる。

3.1.1 AIA 211 Å

観測されるイオン、温度範囲、主な観測対象（活動領域、CH など）

3.1.2 AIA 193 Å

3.1.3 AIA 171 Å

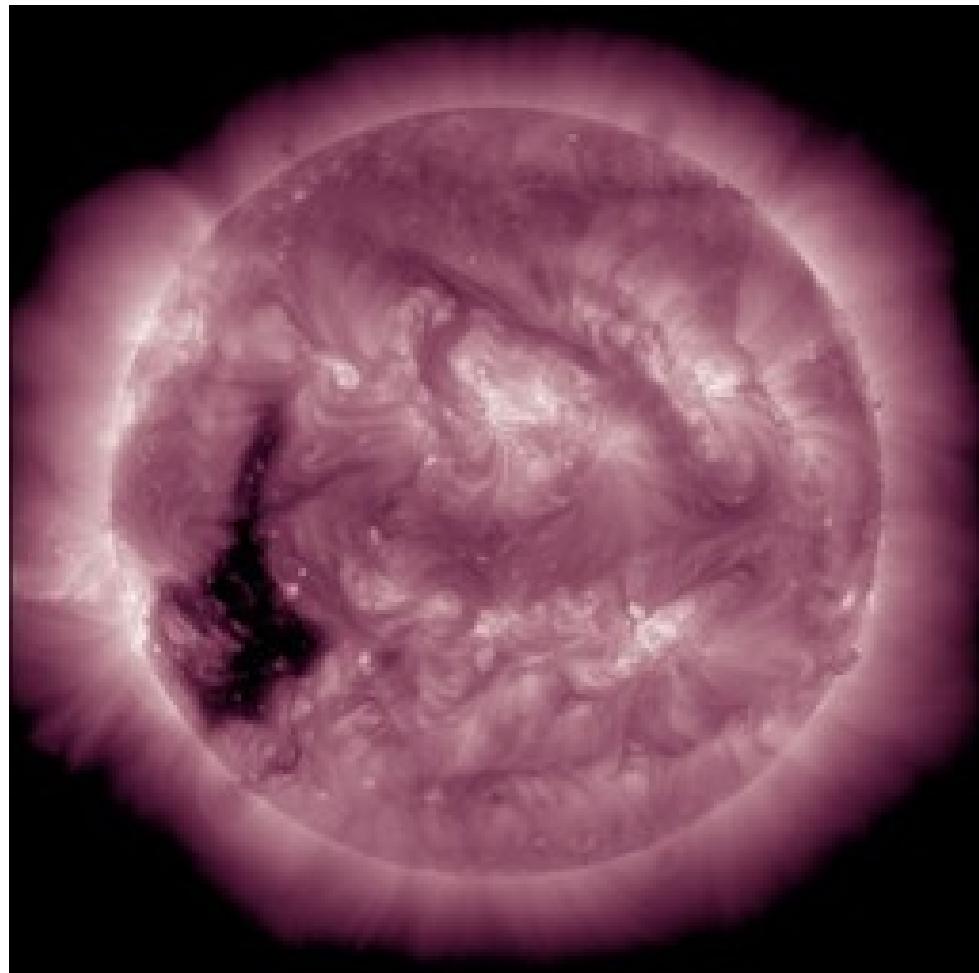


図 3.1: SDO/AIA の 211 Å フィルターで撮影された太陽全球紫外線像。強調のために紫色に色付けされている。球面の中上部から中下部には明るく輝く活動領域が見られ、左下部に暗くコロナホールが観測できる。

3.2 前処理

本研究で用いるデータセットには、SDO/AIA 望遠鏡のデータが提供されている 2010 年 5 月から、2022 年 10 月までのデータが含まれている。

この期間に存在するデータから、4時間ごとにデータを抽出し、各波長ごとに約22000枚(正確な方がいい?)をデータセットに含んでいる。これらのデータを、24枚の画像を1セットとして分割する。各セットは24枚の時系列に並んだ画像で構成され、太陽の時間的依存性および空間的情報を同時に捉えている。24枚のうち、前半の12枚、すなわち44時間後までを入力データ、後半の12枚、すなわち48時間後から92時間後までを出力データとして扱う。学習の際は、前半の12枚に対して後半の12枚を教師データとして扱い、テストの際は12枚の画像データに続くモデルにとって未知の12枚を再現できるか検証する。

このデータセットは第24太陽活動周期の初期から、第25周期の初期までの観測データを網羅している。この時間範囲には、太陽活動の活発性が高いフェーズと低いフェーズの両方が含まれている。従って、このデータセットは太陽活動の活発性に依存しない可能性が高く、その汎化能力に対する期待が一定程度裏付けられる。

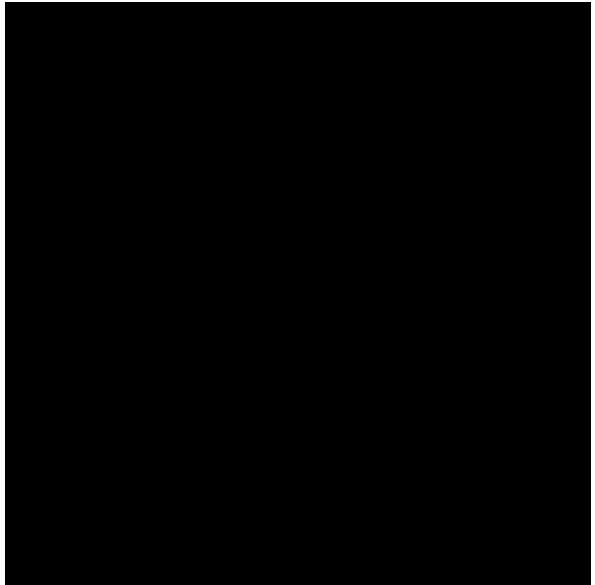
実験	実験1	実験2
入力波長	211 Å	171 Å, 193 Å, 211 Å
出力波長		211 Å
総枚数	22000	66000
セット数		232
セットごとの枚数		入力12 → 出力12
解像度		512 * 512

表3.1: 各実験でのデータセット

3.2.1 不正な画像の除去

SDO/AIA望遠鏡で撮影された全球画像には、露光時間が他の画像より極端に低い、画像内に太陽全体を捉えていない、などの不正な画像が含まれている。確認することができた主な不正な画像を図3.2に示す。

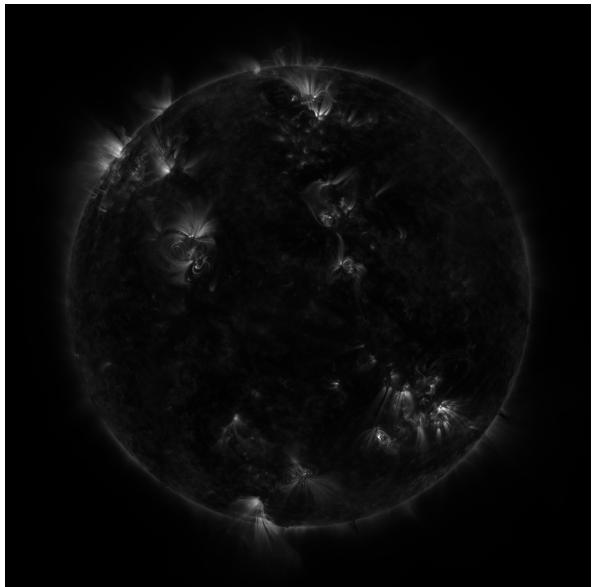
これらの画像は、モデルの学習に悪影響を及ぼす可能性があるため、データセットから除去した。機械学習のタスクによっては、十分なデータセットがあれば、モデルが不正な画像に対する頑健性を獲得し、不正な画像がデータセットに含まれていても、学習結果にあまり大きな影響を与えない場合がある。しかし、本研究で行う動画予測は、データセットに含まれる画像がそのまま教師データとなるため、不正な画像は損失関数の計算、またはモデルの評価に大きな影響を与えるため、慎重に除去する必要がある。データの除去には、FITSファイルのヘッダーに記録された各キーワードの値に対して閾値を設定して判定したのち、numpyによる輪郭検出を用いた月蝕判定関数により不正な画像を排除した。この流れを図に示す。月蝕判定関数は、~~~~~



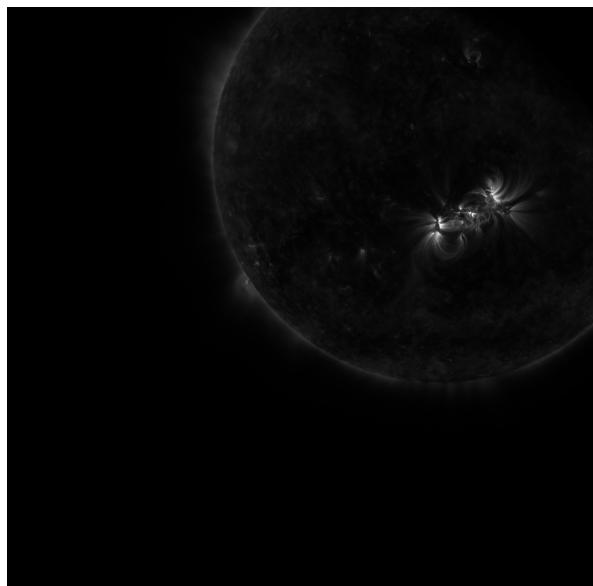
(a) 短い露光時間により、極端に暗い画像。



(b) 太陽が画像の中心にない画像。



(c) 衛星が回転しており、正しい角度で太陽が撮影されていない画像。活動領域の少ない左下部と右上部が極である。



(d) 日食により太陽が隠されている画像

図 3.2: SDO/AIA により観測された不正な画像の例

3.2.2 スケーリングと正規化

3.2.3 データセットの分割

このようにして作成されたデータセットは、約 1000 セットになり、これを学習用データセットに約 800 セット、検証データセットに 50 セット、テストデータセットに 50 セットというように分割した。

第 4 章

Motion Aware Unit を用いた 1 波長を入力とした紫外線像の全球時系列予測

4.1 実験概要

実験 1 では入力、出力とともに 211 Å フィルターで得られたデータを利用した。これは 211 Å フィルターで撮影された紫外線像が、コロナホールと活動領域といった、二つの太陽円盤上の大規模構造をバランスよく明瞭に表現し、本研究のモデルの効果検証に適していると考えたためである。

4.2 学習の推移

4.3 実験結果

4.3.1 全球での評価

平均輝度とその誤差

画像類似度

単純差動回転モデルとの比較

4.3.2 経度依存性の評価

平均輝度とその誤差

単純差動回転モデルとの比較

4.3.3 東側リムから出現する活動領域に対する視覚的評価

4.4 考察

第 5 章

Motion Aware Unit を用いた 3 波長を入力とした紫外線像の全球時系列予測

5.1 実験概要

実験 2 では入力に 171 Å、193 Å フィルターで得られたデータを追加で利用した。これらの波長を追加することで、より広範な温度帯に渡る太陽活動をモデルが学習することを期待している。

5.2 学習の推移

5.3 実験結果

5.3.1 全球での評価

平均輝度とその誤差

画像類似度

単純差動回転モデルとの比較

5.3.2 経度依存性の評価

平均輝度とその誤差

単純差動回転モデルとの比較

5.3.3 東側リムから出現する活動領域に対する視覚的評価

5.4 考察

第6章

まとめ

謝辞

参考文献

- [1] W Dean Pesnell, B J Thompson, and PC Chamberlin. *The solar dynamics observatory (SDO)*. Springer, 2012.
- [2] James R Lemen, Alan M Title, David J Akin, Paul F Boerner, Catherine Chou, Jerry F Drake, Dexter W Duncan, Christopher G Edwards, Frank M Friedlaender, Gary F Heyman, et al. The atmospheric imaging assembly (aia) on the solar dynamics observatory (sdo). *Solar Physics*, Vol. 275, pp. 17–40, 2012.