木星磁気圏の光学観測データに対する Lassoを利用した変動周期のスパース推定

鈴木文晴¹、吉岡和夫¹、吉川一朗¹

1. 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻

2018/9/13 科学とデータ研究集会 @NICT

木星磁気圏とイオプラズマトーラス(IPT)



図:イオ衛星の噴火の様子

(c) NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/ Southwest Research Institute



図:木星とIPTの模式図 [after Audouze et al., 1988]

- 木星の衛星イオは火山活動が活発で、その規模は太陽系の全ての天体の中でも最大級である。
- ・噴火によってイオの公転軌道付近に供給されたガスが電離し、円環状に分布している(イオプラズマトーラス)。
- ・ 硫黄、酸素の原子やイオンが電子衝突励起に起因して可視域、紫外域で発光している(発光強度は~10¹²W)。

IPTの 観測 意義



- 木星半径の約100倍に広がる磁気圏において、IPTは木星から木星半径の6倍と比較的内側に位置している。
- ・粒子、エネルギーの輸送の始点は尾部のリコネクションと考えられているため、IPTの光学観測結果を外部磁気圏に関する観測結果と比較することで、内向き輸送の到達点が分かる。

観測データ

◎ひさき衛星

- •2013年にイプシロンロケットによって打ち上げられた地球周回衛星。
- ・極端紫外光(波長52~148 nm)を観測 波長とする分光器を搭載しており、木 星をはじめとして、太陽系の惑星(時折 彗星や月)を観測している。



※Ri : 木星半径

図2.1 EXCEED観測機による木星観測の概要 EXCEED観測機が木星観測時に使用するスリット はダンベル型の形状をしており、スリットの太い部分 にIPT、細いオーロラ全体を入れて観測を行っている。

ひさき衛星によって観測されたIPTの発光強度

- ◎IPTの発光強度には顕著な周期変動 が見られる
- •周期:10時間、42時間
- ◎関連すると考えられる周期
- イオ衛星の公転周期:42.46 時間
 ・木星の自転周期:9.925 時間
- 定常的に存在するこれらの周期成分 を推定しないと、突発的な増光現象を 特定しにくい



図;IPTの朝側、夕側の発光強度の時間変動。

光学観測データの周期解析

◎ 惑星科学における周期解析:

(目的)系の定常状態に影響する物理現象を明らかにするため、あるいは定常状態と過渡的な変動を区別す るために、特徴的な周期変動を抽出する。

(定式化)時系列データを有限個の周期関数の線形和で表す。



図: Lomb Normalized periodogram法によって導出さ れたイオトーラスの発光強度の周期成分。[Tsuchiya et al., 2015]

- ◎ イオトーラスに存在する周期変動
- 42時間周期変動: イオ衛星の公転周期に同期
- → イオ衛星と磁気圏プラズマ間の相互作用を示唆
- 10時間周期変動:木星自転周期に同期
- → IPTの磁気経度異方性を示唆

※周期変動は、系に内在する多様な現象を表す証拠となる

しかし、ノイズによって生じた偽のピークを見分けるのは困難である。



疎性(スパース)モデリング

◎高次元データに内在するスパース(疎)性を利用することで、データから 最大限の情報を効率よく抽出できる技術の総称。近年、機械学習や情報 数理学の分野で注目されている。

自然科学の統計解析でのモデリングに求められる事項 ①データへの適合度を高める ②必要十分な数の変数によってデータを適切に説明する

◎ 多くの変数から少数の変数を抽出することは、データの背後にある本 質的な構造の理解につながる。

Lasso [Tibshirani, 1992] (Least Absolute Selection and Shrinkage Operator)

「L1ノルム正規化最小二乗回帰」→重要なパラメータの抽出が可能に

Lassoの性質

$$E^{Lasso}(\beta) = \sum_{i} \left(y_i - f_{\beta}(x_i) \right)^2 + \lambda \times \sum_{j} |\beta_j|$$

- ・罰則項によって不要なパラメータの値が '0'と 推定され、パラメータの抽出が可能
- データへの適合度の最適化と、パラメータの 刈り込みによる推定精度の最適化を両立可能
- ・線形回帰や線形変換に基づいた様々な手法 に対して、Lassoを用いた拡張は容易に可能



図:Lassoによるパラメータ抽出の様子の模式図。 最小二乗回帰の解βから離れるとデータへの適 合度が減少する。

$$y_i = \sum_{j=1}^N \beta_j e^{-\frac{2\pi f_j x_i}{N}} \rightarrow E(\beta) = \sum_i \left(y_i - \sum_{j=1}^N \beta_j e^{-\frac{2\pi f_j x_i}{N}} \right)^2 + \lambda \sum_j |\beta_j|$$

例:離散フーリエ変換

Lassoを周期解析に用いた先行研究

◎対象:KIC J1924変光星

- ・発光強度の変動周期の時間変化
 を調査
- ・従来手法(離散フーリエ変換)と
 Lassoによる修正を施した手法を比
 較[Kato and Maehara, 2013]
- Lassoを用いる子とで変光星の変動 周期の時間変化を明確に示すこと に成功している。



図:KIC J1924に対する周期解析の結果 [Kato and Maehara, 2013 より改変] 縦軸が周波数、横軸が時間、グレースケールが強度 左図が短時間フーリエ変換、右図がそれにLassoによる修正 を加えた手法の結果

解析対象

- 対象:
- IPTの朝側から放出されるS⁺ 76.5 nm 輝線の発光強度の時系列データ
- •期間:
- 2013年12月21日~2014年1月15日



図:ひさき衛星によって得られたIPT朝側から放出される 76.5 nmの輝線の発光強度の時間変動

欠損データの補間

- ・離散フーリエ変換は、サンプリン グ間隔が均一で欠落のないデー タに対して使用可能な手法であ る。
- ・ひさき衛星の取得したデータに はデータ欠損が存在するため、 補間が必要である。
- 今回は、一次関数による内挿を 行なった。





図:IPTの発光強度の観測データ(黒点)及びLasso によって得られたフィッティング関数(緑線)。

図:Lasso(緑線)及び離散フーリエ変換(黒線) によって得られたIPTのパワースペクトル。

- ・罰則項の重みを決定するパラメータλを変えることで、フィッティング関数の複雑さとデータに対する適合度を調節できる。
- ・最適なλの決定が肝要な問題となっている。

10分割交差検証による入の決定

◎ 目的

推定精度が最適となるようなλの値を導出する。

- ◎ 手法:交差検証
- データセットを二つに分割し、その片方(訓練データ)で フィッティングし、残りのデータ(検証データ)に対する誤 差を計算する。
- データをランダムに10分割し、分割された標本群それぞれを検証データとする10回の検証を行い、平均値と標準 偏差を求めた。

◎ 結果

- ・検証データに対する誤差は、λ=0.6で最小となる。
- λ=0~1.1では誤差(1σ)の範囲で同程度の推定精度である。

(one standard error $\mathcal{V} - \mathcal{V}$ [Tibshirani, 2001])

全データ





結果

◎ 交差検証の結果より、λ=0(離散フーリエ変換)とλ=1.1とおいたモデルでは、誤差(1σ)の範囲で同程度の推定精度を持つといえる。

- 10時間周期 → 木星の自転周期 [Sandel and Dessler 1978 など]
- 42時間周期 → イオの公転周期 [Sandel and Dessler 1978 など]
- 20時間周期、15時間周期 → 過去の研究 によって報告されていない周期変動。



図:Lasso(緑線)及び離散フーリエ変換(黒線) によって得られたIPTのパワースペクトル。



今回の手法は、一次変換である離散 フーリエ変換をフィッティングの問題に 落とし込んでいるため、欠損データを 補間せずに解析を行う事が可能であ る。

結果:

- 42時間、10時間、20時間、15時間周期に加え、5時間周期の存在が示唆 される結果が得られた。
- 5時間周期成分の存在は、過去の研究によって既に示されたものである [Tsuchiya et al., 2015]



まとめ

- ・離散フーリエ変換にLassoを適用することで、観測データにとって本質的な
 周期成分を同定する新規手法を示した。
- データに対する予測精度が離散フーリエ変換の結果と同等で、より変数の少ない単純な数理モデルによってIPTの周期変動をモデル化することに成功した。
- ・提案手法は欠損の存在するデータに対しても妥当な結果を与えており、 観測に時間的制約のある場合にも適用可能であることが示唆される。
- Lassoは周期解析に限らず数理モデルのフィッティングで普遍的に適用可能であり、多様な観測データへの効果が期待される。