

スパースモード選択による膜面宇宙構造物の運動推定におけるハイパーパラメータの検討

Examination of Hyperparameters in Motion Estimation of Membrane Space Structure by Sparse Mode Selection

○前田賢人¹, 山崎政彦²*Kento Maeda¹, Masahiko Yamazaki²

Abstract: Since the shape of the membrane structure is easily deformed and even minute disturbances may affect the operation, it is desirable to grasp and control the accurate shape in the orbit, but there are various defects in the in-orbit data. So far, the main modes of membrane motion have been estimated from the missing data, and the motion has been estimated by optimizing the mode coefficients in the sense of sparse estimation. In this presentation, we consider the method of calculating the optimum solution of hyperparameters that control the degree of sparseness and the result.

1. 背景

近年、薄膜構造(数 μm)を用いた数十m~数百m級の大型宇宙構造物が深宇宙惑星探査ミッション用のソーラーセイル構造や大型アンテナ構造、スターシェイドなどに利用可能な次世代の宇宙構造様式として注目を集めている。2010年には、JAXAにより小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSが打ち上げられ、宇宙空間での14m四方の膜面の遠心力展開、太陽光子による加速・航行を世界で初めて実証された^[1]。今後は直径40m級の膜面を有するソーラーセイルOKEANOSの木星およびトロヤ群小惑星の探査が計画されている^[2]。

こうした軽量かつ柔軟の性質を持つ膜面構造は、外乱の形状変形への感度が高く、例えば、宇宙環境における微小な外乱でさえも太陽光圧による推進性能や軌道制御、アンテナ感度に影響を及ぼす。すでに軌道上での実験を実施したIKAROSでは、Figure 1に示すように衛星本体から分離したカメラで撮影した画像や、衛星本体から撮影した画像から、3次元の膜面形状の推定が行われた^[3]。

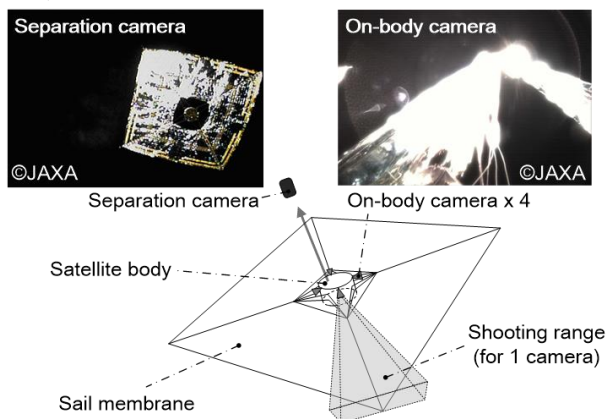


Figure 1 宇宙空間での膜面形状測定例

しかしながら、実際の計測データには膜面にあたる太陽光の影響や、カメラの配置・画角・サンプリングレート等によって時間・空間的に欠損が存在する。そこで、文献^[4]では欠損を有するデータから支配的なモード形状を推定し、計測データとモード・モード係数からなる推定値の二乗誤差を評価関数とするモードの係数を推定する方法により膜面の形状推定が行われた。

モード係数の決定には、欠損していないデータのみを用いた最適化問題を解いており、過学習を引き起こしている可能性があった。

そこで著者らは文献^[5]で、モード係数を決定する評価関数にモード係数のスパース推定項を加えることで、モードの推定をスパースの意味で最適化した。これによって、文献^[4]での手法に比べて推定データの汎化性能が上がり、欠損しているデータの推定精度が向上した。しかし、推定データの汎化性能を調整する重み係数の選定方法が不明確であり、観測したデータから推定する欠損箇所のデータの妥当性が評価できていなかった。

2. 目的

本研究では、欠損データに対して最適な汎化性能で推定するために、重み係数の最適化を実装する。得られたデータを訓練用データと検証用データに分け、重み係数を学習させ検証用データに対して最適な重み係数を決定するが、一部の検証データにのみ最適な重み係数とならないよう、検証データの範囲を変え、複数回重み係数を学習させる。これを交差検証法^[6]という。

この手法を用いて、観測データから算出した推定データの妥当性を評価する。

3. スパース推定を用いた欠損を有する膜面運動推定

本研究では、軌道上の膜面の計測データは、分離カメラや衛星本体の固定カメラ等から得られることを仮定し、時間方向・空間方向に多次元性を有し、かつ欠損を有するような時間 t に関するデータ行列 $\mathbf{x}_y(t)$ から欠損のないデータ行列 $\mathbf{x}(t)$ を推定する問題を考える。

式(1)に示すモード係数を決定する評価関数では、欠損していない部分の推定値 $\hat{\mathbf{x}}$ と観測できた真値 \mathbf{x} との二乗誤差にモード係数の1ノルムのスパース推定項を加えている。

$$\mathbf{b} = \arg \min_{\mathbf{b}} \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|_2 + \lambda \|\mathbf{b}\|_1 \quad (1)$$

スパース推定項には重み係数があり、この値を大きくすると選ばれるモード係数はよりスパースになる。モード係数は推定に使用するモードの選択に影響するため、重み係数の選択は重要である。

本研究では運動推定における最適な重み係数を決定するためにK分割交差検証法を用いる。K分割交差検証法は、推定したいデータ行列をK個に分割し、K-1個のデータ群を訓練データ、残りを検証データとする。訓練データで様々な重み係数で推定を行い、検証デー

タに対する誤差を計算し、その誤差が最も小さい時の重み係数を求め、それぞれの訓練データと検証データで調べ、求めた K 個の重み係数の平均値を全体のデータの重み係数に決定する。

本研究で用いる膜面運動の推定における交差検証法のアルゴリズムを以下に示す。

交差検証法を用いた運動推定アルゴリズム

Step1 Figure 2 に示すように訓練データと検証データのセットを作成。今回は使用するデータの時系列を等分できる分割数5でデータセットを作成する。

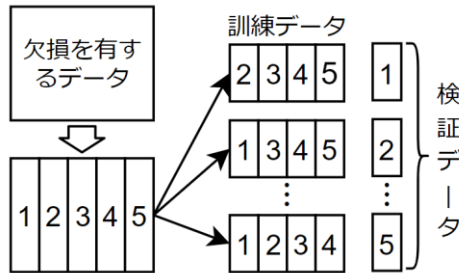


Figure 2 交差検証法におけるデータセット

Step2 各訓練データで評価関数の重み係数 λ を変えて運動を推定。

Step3 訓練データで推定した値と訓練データと対になっている検証データの値で以下の式を使用して誤差 CVE を計算する。

$$CVE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (2)$$

n は欠損していないデータの数である。

Step4 次式で検証データの誤差が最も小さい時の λ を求め、次式で重み係数 λ の平均値 λ_{mean} を求める。

$$\lambda = \arg \min_{\lambda} CVE \quad (3)$$

Step5 Step4 で求めた λ_{mean} を使用して運動を推定。

4. 推定結果

本研究では、数値計算により求めたデータ行列に欠損を与え、上記アルゴリズムで欠損値を推定・補間し、真値との誤差を計算した。数値計算モデルは、膜面をケーブル要素でモデル化し、1辺14[m]、節点数232個で構築した。Table 1にケーブル要素のパラメータを示す。

Table 1 ケーブル要素のパラメータ

Item	Value
Center hub	
Initial angular velocity	18.85[rad/s]
Radius	0.0225[m]
Initial nutation angle	1.803[deg.]
Moment of inertia (Ixx,Iyy,Izz)	(3.02,3.02,4.28) $\times 10^{-5}$ [kgm ²]
Cable	
Young's modulus	3.0[GPa]

Cross section	1.0×10^{-6} [m]
Mass density	1.42×10^3 [kg/m ³]
Compressive stiffness coefficient	1.0×10^4 [-]

解析には非線形有限要素法を用いた。時間・空間的な欠損は、太陽光の反射による膜面形状が不鮮明な状況を仮定し、節点の3次元座標を書く時間ステップ毎にランダムに10%~90%欠損させた。

Figure 3に欠損率10%の時の交差検証法で算出した λ とその時の推定誤差および任意に重み係数 λ を変化させたときの推定誤差を示す。

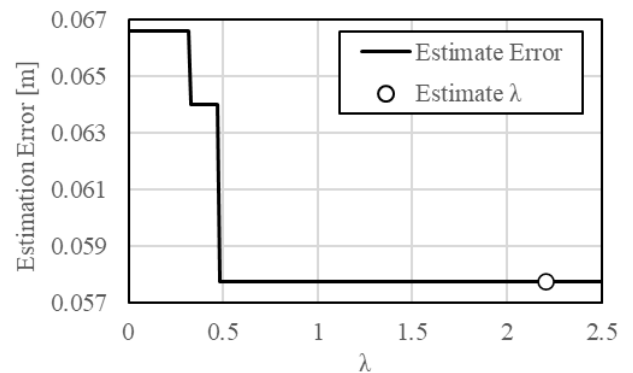


Figure 3 欠損率10%の時の交差検証法で推定した λ と推定誤差

交差検証法で決定した重み係数 λ は2.2であり、Figure 2を見ると、欠損率10%の時は λ が0.5以上で推定誤差が最も小さくなっているため、交差検証法で決定した λ は妥当であるといえる。

5. 結論

観測したデータのみを用いて欠損データに対する最適な汎化性能となる重み係数を交差検証法で求めた。これによって求めた重み係数で推定した欠損箇所の誤差は最小となり、重み係数の決定方法とその妥当性について評価できた。

6. 参考文献

[1] Mori, O. and et al : “World’s First Demonstration of Solar Power Sailing by IKAROS”, 2nd international Symposium on Solar Power Sailing, NY, July 2010
 [2] 森, 治: 「ソーラー電力セイル探査機による外惑星領域の直接探査」, 第17回宇宙科学シンポジウム 講演集, 2017-01.
 [3] Miyazaki, Y., et al, “Conserving Finite Element Dynamics of Gossamer Structure and Its Application to Spinning Solar Sail “IKAROS””, AIAA-2011-2181, Denver, Colorado, 2011.
 [4] Shoji, K., Masahiko, Y., Yasuyuki, M., “Estimation Method of Missing Components for Spin Deployable Membrane Dynamics”, The ISTS special issue of Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan, No.ists31, 2017
 [5] Kento, M, Masahiko, Y, “Motion Estimation of Membrane Space Structure Using Sparse Mode Selection”, 32nd ISTS and NSAT, 2019
 [6] 川野秀一 他: 「スパース推定法による統計モデリング」, p20, 2018年