

# 計測欠損データを有するスピン膜面の運動推定

## Estimation of Motion of Spinning Membrane with Missing Measurements

指導教授 宮崎康行

M6011 河添祥司

Shoji Kawazoe

In recent years, there have been lots of attention in the use of membranes for large space structure application. Typical applications include sunshields, parabolic reflector, solar concentrators, and solar sails. In order to predict the membrane dynamics precisely, it is necessary to use the on-orbit measurement data. However, the on-orbit sail membrane measurement data are incomplete (missing spatio-temporal data) because of sensor placement limitation and disturbances, e.g. sunlight reflection in case of image data. We propose a method of reconstructing incomplete measurement data into perfect measurement data by using membrane motion estimation. We describe an appropriate number of modes to improve estimation accuracy, the number of iterative calculations, and how to determine the appropriate initial estimate value. Further, the applicability of the proposed estimation method is evaluated via microgravity experiments and numerical model data. The experimental/numerical model comprises a spin deployable membrane structure consisted of a square membrane, a center hub, and tethers.

## 1. 序論

### 1.1 研究背景

近年、軽量かつ収納性に優れた特徴から、展開型の膜面宇宙構造物への利用が構想されている。実際に、2010年に14m四方の膜面を有した小型ソーラーセイル実証機“IKAROS”は、宇宙空間での遠心展開・展張・太陽光子による加速・航行を世界で初めて実証した<sup>[1]</sup>。

膜面を有した宇宙構造物の問題は、膜面の形状が変形した際に太陽光圧トルクが変化し、効率的な軌道・姿勢制御が難しい点にある。そこで、長期運用かつ効率的な軌道・姿勢制御をおこなうには、数mm～数十cmオーダーの精度で、膜面の運動を把握する（時々刻々の形状を決定し、そこから適切な制御モデルを構築する）ことが重要になる。

IKAROSでは、本体から分離されたカメラによる膜面の撮影や、宇宙機本体側からの撮影を行い、膜面に取り付けられた測定点と呼ばれる特徴点を三次元データに復元したデータで膜面の形状を推定する方法も行われた<sup>[2]</sup>。しかし、航行中の太陽の光の反射、カメラの配置場所の制限などにより測定値が空間・時間的に断片的な計測データになり、高精度の推定には至っていない(Figure 1)。

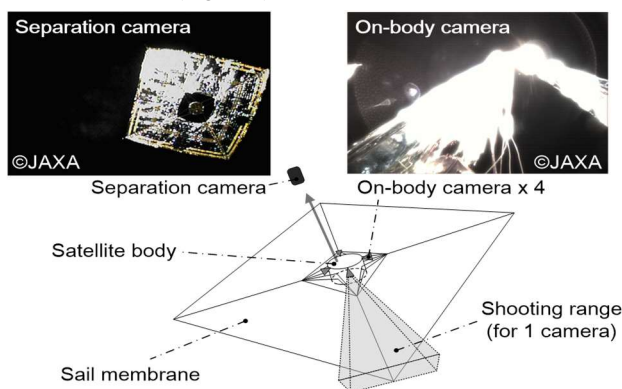


Figure 1 軌道上の膜面の計測例

カメラによる膜面の計測データは、実際の軌道上データであるため、数値計算による膜面の運動推定より信頼度の高いデータである。軌道上データのみで、形状を推定することができれば、より効果的な軌道・姿勢制御が可能になる。

より詳細な膜面形状を把握するためには、太陽光の反射やカメラの死角によって空間・時間的に欠損した膜面の形状を推定する方法が必要になる。

これまでの研究では、数値解析と測定データを組み合わせた推定方法が提案された<sup>[3]</sup>。しかし、膜面の運動の数値解析は、数万から数十万自由度を有する有限要素法モデルなので、膨大な計算コストがかかり、また、数値計算のモデル化誤差、計測データの計測誤差の二つの誤差を含んでしまう。そこで、本研究では、計測データのみで膜面形状を推定する方法を提案する。これにより、計算コストを減らすことができ、実際の軌道上データだけを使うことから、信頼度の高い膜面の運動推定をおこなうことが可能となる。また、計測データには、画像データの分解能による誤差や三次元データに復元した時の計測誤差が含まれているので、膜面の運動のみを推定する方法を提案する。

### 1.2 本研究の目的

前節を踏まえ、計測データのみで膜面の運動推定する方法を提案し、様々な欠損パターンで推定方法の有効性を示すことを本研究の目的とする。具体的な研究内容を以下に示す。

- 固有直交分解(POD)<sup>[4]</sup>を用いた膜面の運動推定方法の構築を行う。
- 数値計算モデルに、ステレオ視法による三次元位置復元で発生する計測誤差を模擬したノイズを足し、膜面の運動推定にどのように影響するか検証する。
- 微小重力実験より得られた実験データを用いて、膜面の運動の推定誤差範囲をブートストラップ法により求める。

## 2. 固有直交分解を用いた推定方法

膜面の運動は、非線形の運動であり、多次元データである。そこで、与えられた多次元データから最も効率よくモード展開できる基底を求める手法である固有直交分解法(POD)を用いる。本研究では、欠損値に初期値を与え、欠損のないデータを作り、固有直交分解を用いて基底と最適なモード係数を求め推定する。この時、膜面の運動推定には、低次の少ないモードだけを用いる。少ないモード数で推定するのは、低次のモードだけで膜面の運動全体をある程度の精度で推定できると考えたからである。また、推定を繰り返すことで、膜面の運動推定の精度が向上させる。

欠損値に対して初期値の与え方、与えられた多次元データから何次のモード数まで使用するか、提案する推定方法を何回繰り返すか、次章で説明する。

推定方法は4ステップで構成されている。

ステップ1：時空間に欠損するデータ  $\mathbf{x}(t)$  の欠損部分に初期値を与え、欠損のないデータ  $\mathbf{x}_e(t)$  を作る．ただし、 $e = 0$  である．

ステップ2：欠損のないデータ  $\mathbf{x}_e$  を固有直交分解 (POD) し、POD基底  $\phi^k(x)$  とモード係数  $b_k(t)$  を求める．この時の  $M$  は、モード数を表している．

$$\mathbf{x}_e \approx \sum_{k=1}^M b_k(t) \phi^k(x) \quad (1)$$

ステップ3：式(2)の推定誤差  $E$  を最小にするモード係数  $\eta_k(t)$  を求める．ただし、式(2)の右辺の計算には、欠損していない成分のみを用いる．

$$E = \left\| \mathbf{x}(t) - \sum_{k=1}^M \eta_k(t) \phi^k(x) \right\|_m^2 \quad (2)$$

ステップ4：ステップ2で求めたPOD基底  $\phi^k(x)$  とステップ3で求めた  $\eta_k(t)$  を用いて、まず  $M = 1$  から推定値  $\mathbf{x}_{e+1}$  を求め、 $e=e+1$  として、ステップ2に戻る．

$$\mathbf{x}_{e+1} = \sum_{k=1}^M \eta_k(t) \phi^k(x) \quad (3)$$

ステップ2～ステップ4を繰り返し、推定誤差  $E$  が与えられた値以内に収束したら、モード数  $M$  を一つ増やし、再び推定を繰り返す．

### 2.1 初期値の推定

これまでの研究<sup>[6]</sup>では、初期値を時間方向の平均値で補う方法を行っていた．しかし、固有直交分解を行う際に、初期値の影響により、POD基底の推定精度が下がる事が分かり、線形補完を用いることで、POD基底の推定精度を向上させる．初期値の与え方は、Figure 2の●のような欠損値は、行の中で欠損していない最も近い値の先頭と末尾の平均を代入する．また、行の端の値は、最も近い値を代入する(Figure 2)．

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ◆ | ▲ | 5 | 3 | ■ | → | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 8 | 9 | ● | 1 | 4 |   | 8 | 9 | 5 | 1 | 4 |
| ■ | 4 | 9 | 8 | 7 |   | 4 | 4 | 9 | 8 | 7 |

|   |   |                                                 |
|---|---|-------------------------------------------------|
| ● | = | Linear interpolation(row) ( $\frac{9+1}{2}=5$ ) |
| ▲ | = | The nearest non-missing value(row)              |
| ■ | = | The nearest non-missing value(row)              |
| ◆ | = | The nearest non-missing value(row)              |

Figure 2 初期値の推定

### 2.2 繰り返し計算回数の決定

推定値のノルム  $\|\mathbf{x}_b\|$  と繰り返し計算により更新された推定値のノルム  $\|\mathbf{x}_{b+1}\|$  の差が 0 に収束した時、適切な繰り返し計算の回数として決定する．Figure 3 は、膜面の運動データが 60%欠損している条件で、推定方法を用いて、欠損データを復元した時の繰り返し計算 1 回と 40 回のモード形状  $\phi^1(x)$  を比較した図である．繰り返し計算の回数が増えることによって、推定値のモード形状が真値のモード形状に近づいていることが分かる．

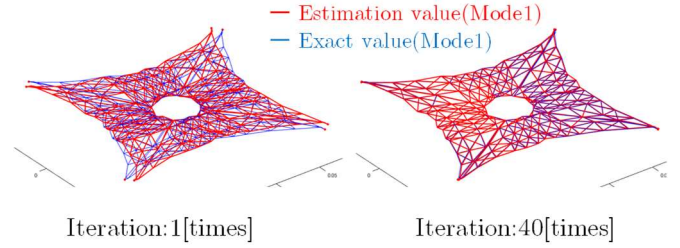


Figure 3 基底ベクトルの比較

### 2.3 モード数の決定

モード数の決定では、式(2)より計測できているデータのみで誤差が最小になるようにモード係数を決定しているのですが、実際は、欠損している部分と真値の誤差がどのようになっているかわからない．モード数を多くし、膜面の運動を推定すると欠損しているデータが真値と大きくずれる可能性がある．そこで、欠損の全くないデータの一部を欠損データとして扱い、推定値と真値との差が最小になるモード数を適切なモード数として決定する．この方法により、各モード数で、真値に最も近い推定値を求めることができるモード数を決定できる．ここでは、欠損していない部分と欠損している部分に相関関係があると仮定し、モード数を決定している．

### 3. 推定方法の検証

本研究では、推定方法の検証のために、有限要素法を用いた数値解析モデルと微小重力実験で得た実験モデルを用いて検証する．また、計測ノイズを模擬するために、数値計算モデルに既知のノイズを加えることで、計測ノイズが与える膜面の形状推定精度の影響を検証する．

また、本検証では、ランダムに欠損するパターンと不規則に欠損する (Irregular) パターンの二つを行う．ランダムパターンは、太陽光の反射によって膜面が反射し、膜面形状が不鮮明な状況を模擬している．検証する欠損率は、全データから 10%～90% で検証を行う．不規則欠損パターンは、カメラの画面角から外れ、膜面形状が不確かな状況を模擬している．

#### 3.1 数値解析モデルを用いた推定方法の検証

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．解析には、有限要素法を用いており、膜面が展開する時の運動を計算し、節点位置の時系列データを作った．その節点位置の時系列データから、Figure 4 の 12 個の点を欠損させたデータを作り、2.3 章で述べたようにモード数の決定を行った．Table 1 にケーブル要素のパラメータを示す．膜面の運動推定に用いるデータは、0.075[sec]～0.500[sec]のデータを用いた(Figure 5)．

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)×10 <sup>-5</sup> [kgm <sup>2</sup> ] |
| Cable                             |                                                       |
| Young's modulus                   | 3.0[GPa]                                              |
| Cross section                     | 1.0×10 <sup>-6</sup> [m]                              |
| Mass density                      | 1.42×10 <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]             |
| Compressive stiffness coefficient | 1.0×10 <sup>-4</sup> [t]                              |

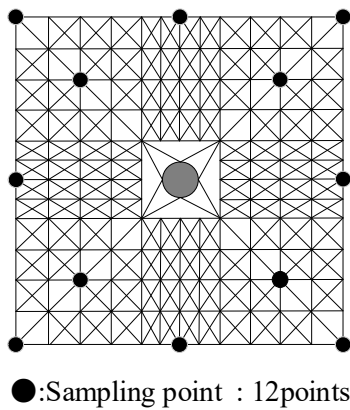


Figure 4 数値計算モデル

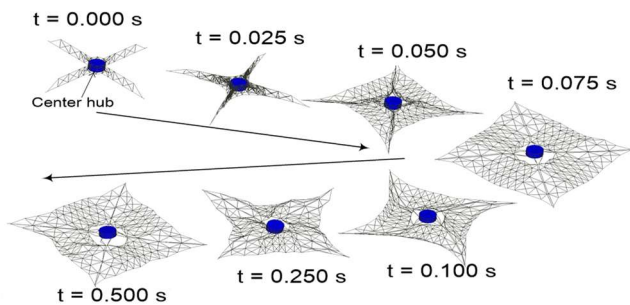


Figure 5 数値計算モデルの展開挙動例

### 3.1.1 ランダムパターン

前章で述べた推定方法を用いて、時間・空間的にランダムに欠損するパターンを行う。この検証では、計測誤差によるノイズが膜面の運動推定精度に影響するか確認する。そのため、ノイズありのデータとノイズなしのデータ二つで検証する。ノイズありのデータは、ガウス分布に則って作る(Figure 6)。この時、平均 0、分散 0.1 のガウス分布に則ったノイズを与える。

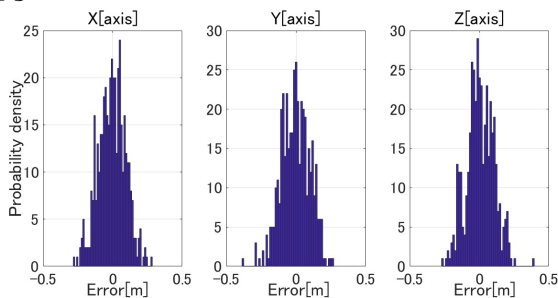


Figure 6 各軸のガウス分布

本研究で提案した推定方法を用いて、ノイズなし・ノイズありのデータで最適なモード数を使い、各欠損値の推定値と真値の差の平均を Figure 7 に示す。また、ノイズありの全てのモードを使った推定値と真値の差の平均を Figure 7 に示す。

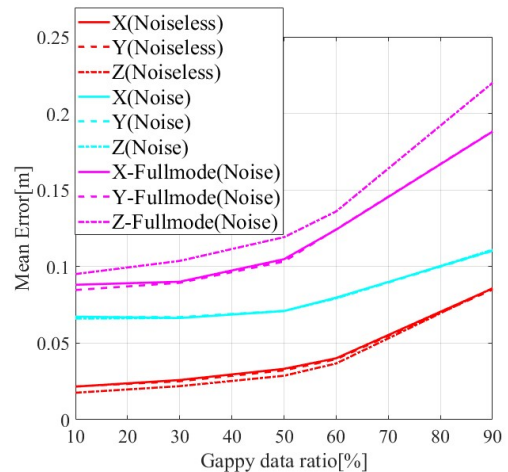


Figure 7 ランダムパターンの各欠損値の推定結果

### 3.2 微小重力実験の実験モデルを用いた推定方法の検証

微小重力実験では、小型膜を用いて地上実験で宇宙環境を模した微小重力・真空環境下での遠心展開膜面の展開・計測実験を実施した。遠心展開する膜面を高速度カメラで撮影し、撮影した画像からステレオ視法による三次元位置の測定を行う。この時、三次元位置の測定を行う特徴点は、Figure 8 の赤点 56 点であり、特徴点 56 点の時系列データを作成した。また、作成した時系列データは、ステレオ視法による三次元位置の測定により測定誤差が生じる。微小重力かつ真空環境下の実験概要及び測定誤差の各軸の平均を Figure 8 に示す。

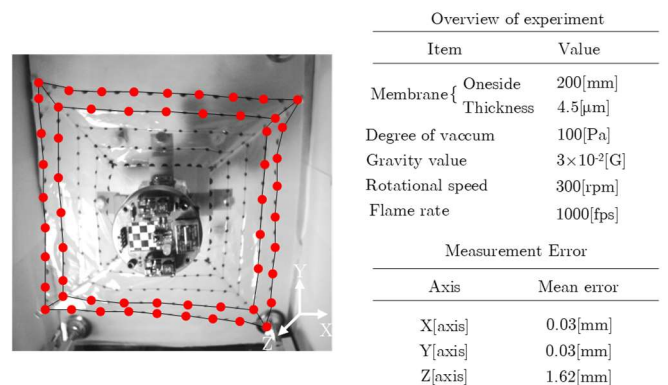


Figure 8 微小重力実験概要・測定誤差

#### 3.2.1 ランダムパターン

前章で述べた方法を用いて、膜面の運動を推定する。真値と推定値の各軸の誤差の平均を Figure 9 に示し、欠損率 70% のブートストラップ法(BM)<sup>[7]</sup>による推定誤差範囲を Figure 10 に示す。

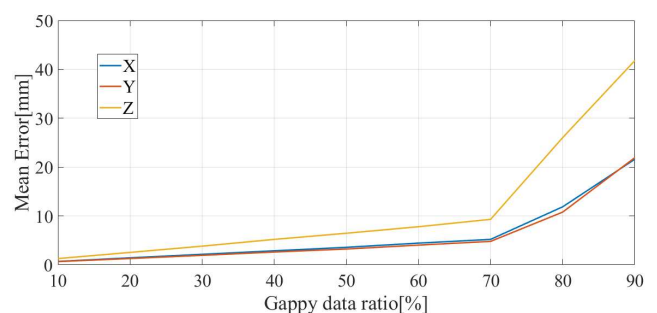


Figure 9 ランダムパターンの各欠損値の推定結果

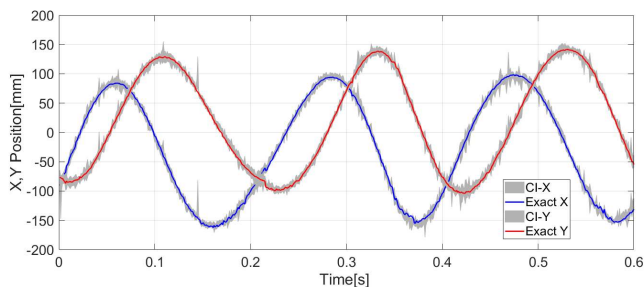


Figure 10 ブートストラップ法による推定誤差範囲(X,Y 軸)

### 3.2.2 不規則欠損パターン

不規則欠損パターンは、Figure 11 の右図の黄色で囲んだ部分のデータが欠損する。この時、0.02 秒毎に黄色の欠損部分は、Figure 11 の右図の様に不規則に変化する。Figure 12 には、任意の特徴点の真値と推定値の時系列データを比較した結果を示す。Figure 12 の黄色で囲まれている部分は、欠損している部分を示している。

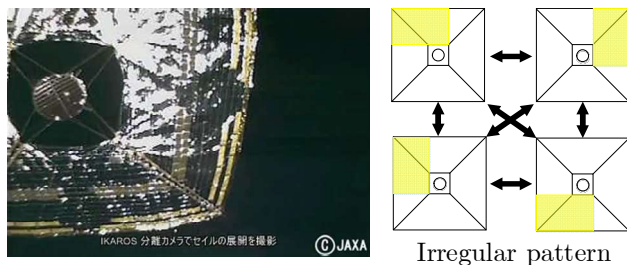


Figure 11 不規則欠損パターン

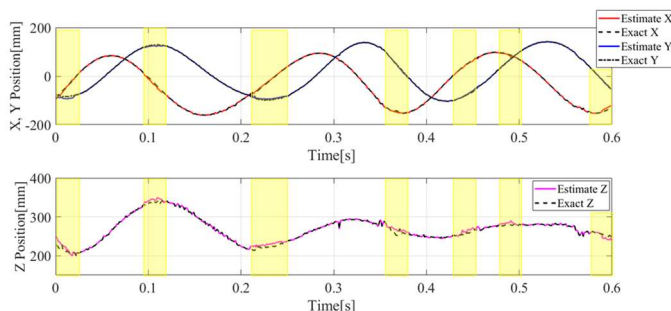


Figure 12 不規則欠損パターンの推定結果

### 3.3 考察

ノイズを含んだデータとノイズを含まないデータの比較 (Figure 7) により、適切なモード数で膜面の運動を推定した結果、欠損率 10% の時、各軸で約 0.05m の真値との差があった。これは、各欠損率の中で最大であり、欠損率が上がるに連れて真値との差が小さくなっている。これは、式(2)より計測できているデータのみで誤差が最小になるようにモード係数を決定しているの、計測できているデータに含まれるノイズがモード係数に影響したと考えられる。また、ノイズを含んだデータを用いて、全てのモード数で運動推定した結果と適切なモード数で運動推定した結果を比較すると、適切なモード数で運動推定した方が真値に近い値が得られた。これは、3.1.1 章で与えたノイズが適切なモード数以降に影響したと考えられる。よって、ノイズは、高次のモードに含まれていると考えられ、適切なモード数を選定することで、ノイズによる運動推定精度の低下を抑えることができる。また、Figure 9

の結果より、欠損率 70% 以降、膜面の運動推定精度が悪くなっている。これは、欠損率 70% 以降、欠損していないデータと欠損しているデータに相関があるという仮定が成り立っていないからだと考えられる。また、ブートストラップ法により、推定値の誤差範囲が約 9% であることを明らかにした。これは、真値に対して、数十 cm オーダーの信頼区間で推定が可能である。また、Figure 12 の結果より、空間的に大きく欠損しても運動の推定ができることを確認した。

## 4. 結論

- 固有直交分解(POD)を用いた推定方法の構築を行い、初期値や適切なモードの数、繰り返し計算数の選定方法を明らかにした。
- 数値計算モデルより、ノイズを与えたデータを作成し、ノイズが膜面の運動推定に与える影響を明らかにした。
- ブートストラップ法を用いて、推定の誤差範囲を明らかにした。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP17H03477, JP15K18285 の助成を受けたものです。

## 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 Sailing, Brooklyn, NY, July 2010. S. Nasir Adeli and Vaio Lappas : Deployment System for the CubeSail nano-Solar Sail Mission, Proceedings of Small Satellite Conference, SSC10-VIII-3, 2010, pp.1-12
- [2] Miyazaki, Y., et al, "Conserving Finite Element Dynamics of Gossamer Structure and Its Application to Spinning Solar Sail "IKAROS", " AIAA-2011-2181 (Proceedings of 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference), Denver, Colorado, pp.1-17, April 4-7, 2011.
- [3] Yamazaki, M., Mita, K., Miyazaki, Y., "Empirical Data Driven Model for Sail Membrane Dynamics Estimation," The ISTS special issue of Transactions of JSASS (The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences), Aerospace Technology Japan, Vol. 14, No. ists30, 2016.
- [4] 平: 固有直交分解による流体解析: 1. 基礎, ながれ 30, 2011
- [5] Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(2000), pp.1330-1334
- [6] Kawazoe, S., Yamazaki, M., Miyazaki, Y., "Estimation Method of Missing Components for Spin Deployable Membrane Dynamics" The ISTS special issue of Transactions of JSASS (The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences), Aerospace Technology Japan, ists31, 2017.
- [7] Konishi, S., Ochi, M., and Omori, Y.: Methods in Computational Statistics, -Bootstrap, EM algorithm, MCMC-, Asakura Publishing, 2008, (in Japanese).