

固有直交分解を用いた計測データと数値解析の統合による遠心力展開膜面の形状推定 Shape Estimation of Spinning Membrane by Fusion of Measurement Data and Numerical Analysis Based on Proper Orthogonal Decomposition

指導教授 宮崎康行

M3021 三田恭平

1. 序論

1.1. 背景

近年、ソーラーセイルや大型太陽光発電パドル・大型通信アンテナ等の大型展開宇宙構造物に関する研究が盛んに行われている。これらは、搬送コストの観点から高収納かつ軽量であることが望ましく、膜面やインフレータブル構造といった極めて柔軟な構造物の利用が注目されている。2010年5月には、JAXAにより小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS (Fig. 1) が打ち上げられ、宇宙空間で14m四方の膜面の遠心力展開・展張、太陽光子による加速・航行を世界で初めて実証した。IKAROSの成功によって、ソーラーセイルによる宇宙推進方法が実証されただけでなく、深宇宙探査における大面積薄膜太陽電池の利用可能性についても実証された¹⁾。

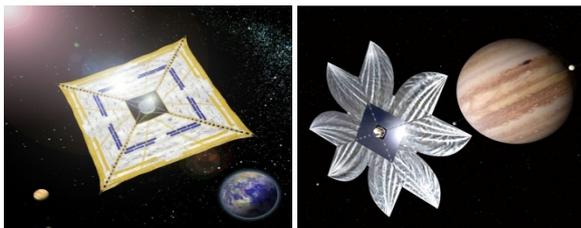


Fig. 1 左:IKAROS,右:木星及びトロヤ群探査計画

IKAROSでは、本体から分離したカメラによる膜面の撮影 (Fig. 2) や、宇宙機本体側から膜面の撮影 (Fig. 3) を行い、膜面状のしわを含む形状が推定された²⁾。しかし、センサやカメラの配置、精度の制限や、航行中の太陽光の反射などが原因となり十分な形状推定には至っていない。一方で数値解析による形状の予測に関しては高い非線形性を有する膜面宇宙構造物を安定に解く方法として、エネルギー・モーメント法 (EMM) をベースとした非線形有限要素法を用いた解析手法が提案され、IKAROSの軌道上のデータと数値予測結果を比較することにより、数値予測手法の妥当性を示すという段階にまで至った³⁾。しかしながら、計算コストや信頼性の面で長期の予測に耐えるものではない。今後の木星探査等の長期ミッションを想定すると姿勢や軌道の制御のために膜面形状の推定は必須の技術であり、実際の計測データと数値解析とを合わせ込んだ膜面の形状推定法が必要である。

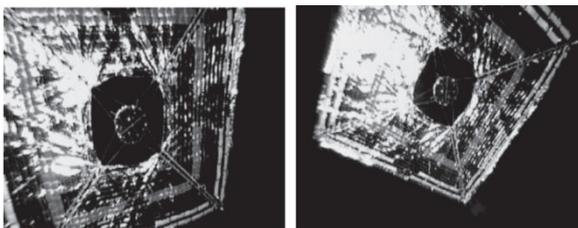


Fig. 2 分離カメラで撮影した IKAROS の画像



Fig. 3 宇宙機本体側から撮影した IKAROS の画像

1.2. 研究目的

前述の通り、形状推定には軌道上計測データだけでは不十分で、数値解析との統合が必要である。本研究では固有直交分解を用いた計測データと数値解析を合わせた形状推定法を提案し、地上実験のデータと数値解析から提案手法の有効性を検証することを目的とする。

そこで、第2節では提案手法の検証のためにソーラーセイルを模した遠心展開膜について真空下における膜面形状を精度よく計測可能な地上実験システムの構築及び計測を行う。第3節では固有直交分解による欠損データの再構築手法の有効性を、第2節で計測された結果とソーラーセイルを模した遠心展開膜モデルの計算結果例より示す。

2. 遠心力展開による地上実験システムの構築及び計測

2.1. 地上実験システム

遠心展開する膜面展開宇宙構造物の三次元位置の測定を行う際に用いた実験装置について説明する。大型真空槽を Fig. 4、実験装置の配置図を Fig. 5 に示す。膜面は IKAROS をモデルとした四角形膜面を作成し、大型真空槽内に取り付けられた中心剛体に固定され、大型真空槽内にあるモータを回転させることにより遠心展開を行う。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による三次元位置の測定を行う^{4),5)}。



Fig. 4 真空槽

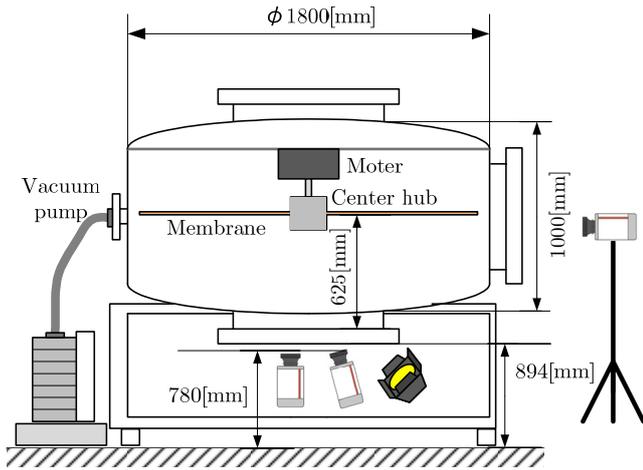


Fig. 5 実験装置配置図

膜面モデルは一辺 420[mm]の膜面を作成し、2台の高速カメラで形状復元するための特徴点を添付した。Fig. 6に作成した膜面モデルを示す。

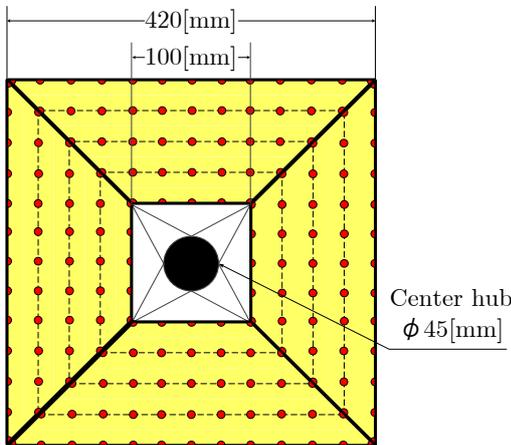


Fig. 6 四角形膜面モデル

2.2. 測定結果

今回構築した実験システム及び膜面モデルにおいて、Center hub のスピンドルを 3[Hz]、高速度カメラの撮影速度を 1000[fps]にて実験を行った。撮影された画像を Fig. 7 に示す。

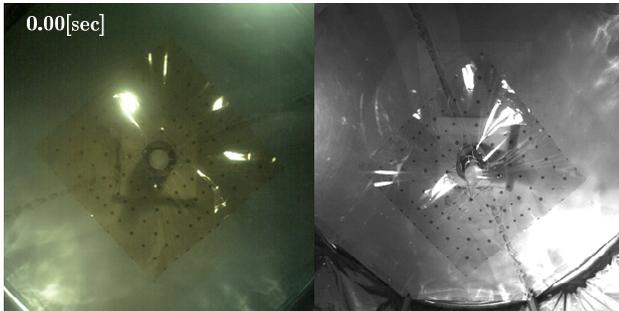


Fig. 7 展開画像

Fig. 7 に示す画像は 10[ms]毎の計 100 枚の画像を撮影した中の 0.00[sec]における画像であり、この画像を用いて三次元位置を復元したものを Fig. 8 に示す。また、この実験における計測誤差は 1.09[mm]であった。

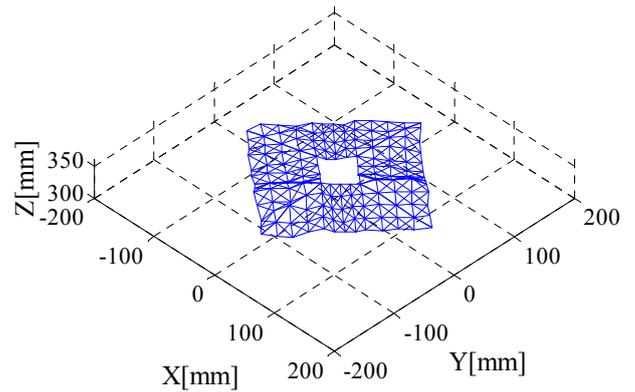


Fig. 8 三次元復元画像の例

3. 固有直交分解法によるデータ再構築手法

3.1. 固有直交分解

固有直交分解法は、与えられた多次元データから低次元成分を抽出する分解法であり、すなわちデータのある評価関数に対して、最も効率良く展開できるように基底を求める手法である。評価関数の取り方次第では、与えられたダイナミクスの時系列データから支配的な運動モードを取り出すことが可能である。固有直交分解を用いた欠損データの再構築に関しては Everson と Sirovich により欠損した画像データの再構築という静的問題や流体解析に対して適用された⁶⁻⁹⁾。有限要素法解析においては以下のように、欠損を含むデータを記述することができる。

$$\mathbf{x}_g(t) = m(\mathbf{x}, t)\mathbf{x}(t) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ であり、 n は有限要素の節点数×節点自由度であり、 $m(\mathbf{x}, t) \in \mathbb{R}^n$ は時刻毎のデータが得られているか欠損データかを表現している。

$$m(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} 1 & \text{if the component is known in } (\mathbf{x}, t) \\ 0 & \text{if the component is missing in } (\mathbf{x}, t) \end{cases} \quad (2)$$

また、 $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ を何等かの推定、例えば数値解析から得られたデータ欠損のない完全なデータとし、固有直交分解を行う。 $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ を r 次元の基底で表して、また、元の n 次元空間に戻した際の残差が最小になるように取る (argmin) と、基底を $\{\phi_k\}_{k=1}^r$ として、上述の射影は、

$$\mathbf{\Pi} = \sum_{k=1}^r \phi_k \phi_k^T \quad (\mathbf{\Pi}^2 = \mathbf{\Pi}, \sum_{k=1}^r \phi_k^T \phi_k = \mathbf{I}_r) \quad (3)$$

となる。これはデータの分散を一番大きく取れる方向にデータを射影することと同じであり (argmax), 以下の最適化問題を解くことで求められる。

$$\begin{aligned} \{\phi_k\}_{k=1}^r &= \arg \min_{\{\phi_k\}_{k=1}^r} \int_{t_1}^{t_N} \|\tilde{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{\Pi} \tilde{\mathbf{x}}(t)\|^2 dt \\ &= \arg \max_{\{\phi_k\}_{k=1}^r} \int_{t_1}^{t_N} \|\mathbf{\Pi} \tilde{\mathbf{x}}(t)\|^2 dt \end{aligned} \quad (4)$$

これにより、 $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ は以下のように分解して表現することが出来る。

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \sum_{k=1}^N \tilde{\xi}_k(t) \tilde{\phi}^k(\mathbf{x}) \quad (5)$$

ここで、 $\tilde{\xi}_k(t)$ は k 番目の時間モードであり、 $\tilde{\phi}^k(\mathbf{x})$ は k 番目の空間モードを示す。この空間モードを用いて、得られているデータにより定義される時空間領域において以下の汎関数の最小化を考える。

$$F_g[\tilde{\xi}_k] = \left\| \mathbf{x}(t) - \sum_{k=1}^M \tilde{\xi}_k(t) \tilde{\phi}^k(\mathbf{x}) \right\|_m^2 \quad (6)$$

ここで、 $(\mathbf{u}, \mathbf{v})_m = ((\mathbf{m} \cdot \mathbf{u}), (\mathbf{m} \cdot \mathbf{v}))$ のような内積とそれに対応するノルム $\|\mathbf{v}\|_m = (\mathbf{v}, \mathbf{v})_m$ を定義する。ここで、 M は欠損データの再構築に用いる固有直交分解のモード数を表している。上式の汎関数の最小化は以下のような線形代数方程式に書き下すことができる。

$$\sum_{j=1}^M (\tilde{\phi}^i(\mathbf{x}), \tilde{\phi}^j(\mathbf{x}))_m \tilde{\xi}_j(t) = (\mathbf{x}(t), \tilde{\phi}^i(\mathbf{x}))_m \quad (7)$$

$\tilde{\xi}_j(t)$ について(7)式を解けば、欠損データの推定 $\tilde{\mathbf{x}}_g$ は、

$$\tilde{\mathbf{x}}_g(t) \approx \sum_{i=1}^M \tilde{\xi}_i(t) \tilde{\phi}^i(\mathbf{x}) \quad (8)$$

のように表現することができる。

最後に、欠損を含むデータ \mathbf{x}_g の欠損部を欠損データの推定値 $\tilde{\mathbf{x}}_g$ と $\mathbf{x}_g = \tilde{\mathbf{x}}_g$, if $m_i = 0$ のように置き換えることで推定値と真値を分けることができる。

3.2. 計算結果

3.1節で述べた固有直交分解法を用いて、数値解析よりダイナミクスの時系列データから支配的な運動モードを取り出し、2節で測定された計測データに意図的に欠損を与え、数値計算の結果より欠損データの再構築の有効性を検証する。数値解析では非線形有限要素解析を用いて、Fig. 9とTable 1に示すような中心剛体(回転自由度のみを考慮)と膜面を模したケーブル要素からなる四角形膜面の展開モデルを構築した。膜面は中心剛体のスピンによる遠心力によって展開し、その過程を計算する。そのダイナミクスの過程においてFig. 10に示す赤い接点箇所が欠損した場合の欠損データの再構築の結果を示し、提案する欠損データの再構築手法の有効性を示す。

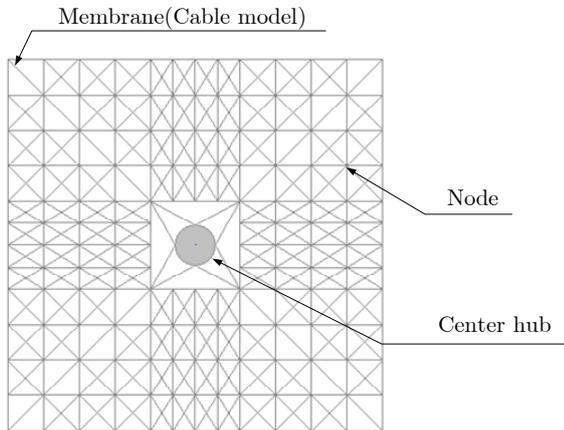


Fig. 9 四角形膜面の展開モデル

Table 1 四角形膜面の計算パラメータ

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)x10 ⁻⁵ [kgm ²]
Cable	
Young's modulus	3.0[GPa]
Cross section	1.0x10 ⁻⁶ [m]
Mass density	1.42x10 ³ [kg/m ³]
Compressive stiffness coefficient	1.0x10 ⁻⁴ [-]

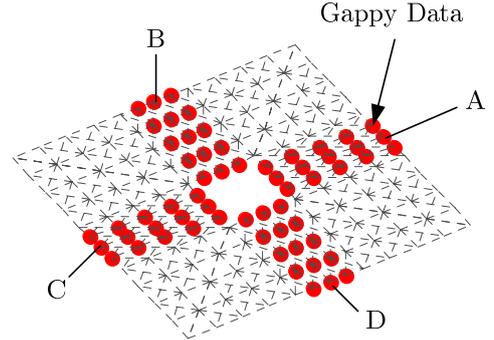


Fig. 10 節点の欠損箇所

Fig. 11は数値計算の結果より得られた固有値の寄与率を表すものである。2個のモードにおいて寄与率は99.99[%]を超えるため(固有モード1の寄与率50.02[%],固有モード2の寄与率49.96[%]), Fig. 9とTable 1に示すような膜面モデルの運動では2個のモードによって運動を十分表現出来る。しかし数値計算による結果では微小な運動のモードによる寄与率が低いため、2個のモードでは膜面の運動を適切に表現出来ていない。展開された膜面の運動での固有直交分解による実験データの再構築には8個のモードを用いて欠損データの再構築を行う。

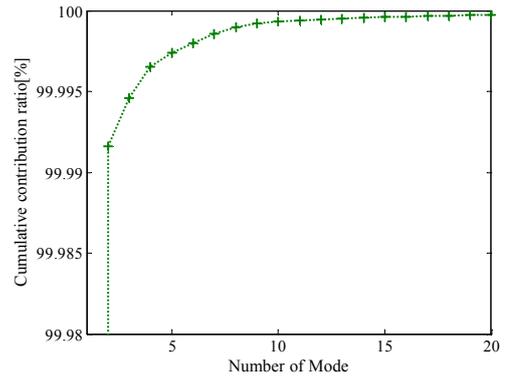


Fig. 11 固有値の寄与率

Fig. 10に示す赤い節点の欠損箇所のA,B,C,D点の位置座標をFig. 12に示す。赤い実線が固有直交分解法より得た推定値で、黒い点線が実験による真値である。また、Fig. 13に0.50[sec]における推定値と真値の膜面全体の形状を示す。Fig. 14は8個のモードを用いて欠損データを推定した際の固有直交分解による推定値と欠損していない箇所のデータとの差を表したものである。構造全体の運動に対して、誤差は非常に小さく、欠損データが再構築されていることを確認した。

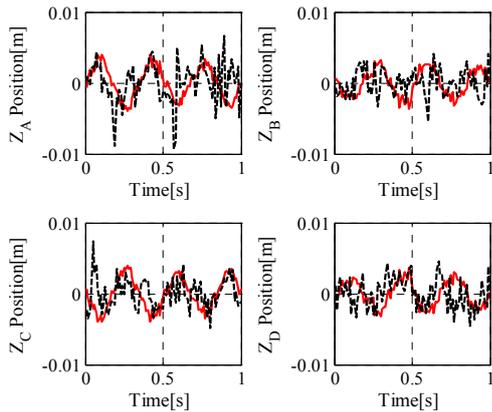


Fig. 12 A,B,C,D 点の Z 座標の比較
(赤実線:推定値,黒点線:真値)

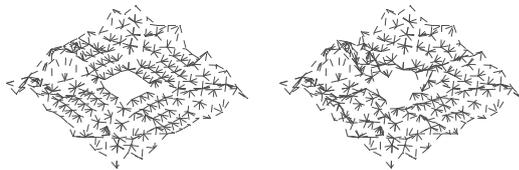


Fig. 13 0.50[sec]後の膜面形状(左:推定値,右:実験値)

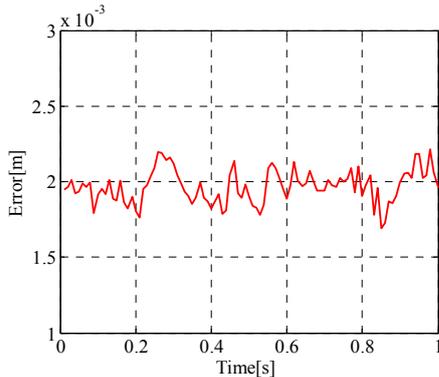


Fig. 14 誤差の絶対値の平均値

4. 考察

数値解析で扱った四角形膜面モデルは展開された状態の膜面が中心剛体の回転自由度のみの運動であるため固有モード 1,2 への寄与率が高いと考えられる。モードの抽出には IKAROS の二次展開のような複雑なダイナミクスではより多くのモードを取り出す必要がある^{10), 11)}。固有値の値が高いものほど支配的なモードであるため Fig. 11 の固有値の寄与率や Fig. 14 の誤差の絶対値の平均値の値をモード数 M を決定する際の一つの指数になると考えられる。

5. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- 膜面形状を計測可能な実験システムの構築及び計測を行い、ダイナミクスの時系列データから三次元形状の復元を行った。
- 提案手法の有効性を、四角形膜面の展開モデルより得られた数値解析結果と地上実験より得られたダイナミクスの時系列データの結果より示した。

今後、地上実験による真空度やスピンレート、膜面サイズ、姿勢の変化を与え、さらには IKAROS の二次展開を

模したダイナミクスより得た計測データと数値解析の統合を行い膜面の形状推定を行っていく。

本研究の提案手法を用い、時間・空間的にデータ量の少ない軌道上データと数値解析の統合により適切な固有モードが得られれば、長期運用において低コストでの運用が可能となる。また、地上実験と数値解析の結果から相似則と合わせるにより事前の展開挙動の予測が出来る。

6. 参考文献

- Mori, O. et al., World's First Demonstration of Solar Power Sailing by IKAROS, Proceedings of 2nd International Symposium on Solar Sailing, <http://www.citytech.cuny.edu/iss2010/proceedings.shtml>, 2010.
- 知識, 森, 澤田, 白澤, 分離カメラ画像の陰撮による IKAROS の膜面形状推定, 日本航空宇宙学会論文集, pp167-172, 2012
- 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.
- 植芝, 富田, 平面パターンを用いた複数カメラシステムのキャリブレーション, コンピュータビジョンとイメージメディア, 2002
- Z. Zhang., A Flexible New Technique for Camera Calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334, Nov 2000.
- Venturi, D. and Karniadakis, G., Gappy data and reconstruction procedures for flow past a cylinder, Journal of Fluid Mechanics, 519, pp.315-336, 2004.
- Everson, R., Sirovich, L., The Karhunen-Loeve Procedure for Gappy Data, Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision, Volume 12, Issue 8, pp.1657-1664, August 1995.
- Bui-Thanh, T and Damodaran, M, Aerodynamic Data Reconstruction and Inverse Design Using Proper Orthogonal Decomposition, AIAA JOURNAL, Vol. 42, No. 8, August 2004.
- 平, 固有直交分解による流体解析:1.基礎, ながれ 30, pp.115-123, 2011
- Yamazaki, M., Mita, K., and Miyazaki, Y., Shape Estimation of Deployable Membrane Space Structure by Fusing Measurement Data and Numerical Analysis, 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013-c-47, Nagoya, Japan, June 2013.
- 三田, 山崎, 宮崎, “計測データと数値解析を統合による遠心力展開膜面の形状推定,” 第 57 回宇宙科学技術連合講演会講演集, No.3M06, 鳥取県米子市, 2013.