K7-27

スピン展開膜面のダイナミクス推定のための計測欠損データの推定方法

Estimation Method of Missing Components for Spin Deployable Membrane Dynamics

○河添祥司[1]，宮崎康行[1]，山﨑政彦[1]
Shoji Kawazoe[1], Yasuyuki Miyazaki[1],Masahiko Yamazaki[1]

In recent years, there have been lots of attention in the use of membranes for large space structure applications. Typical applications include sunshields, parabolic reflectors, 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 limitations and sunlight reflection. This paper proposes an estimation method in which past measurement data and current incomplete measurement data are used to estimate membrane dynamics. Further, the applicability of the proposed estimation method is evaluated via microgravity experiments. The experimental model used comprises a spin deployable space membrane structure consisting of a square membrane, a center hub, and tethers.

1.　諸元

1.1 背景

近年，太陽光圧を推進力とするソーラーセイルをはじめとして，大型アンテナの反射面，太陽発電衛星などの大型宇宙構造物において，膜面の利用が注目されており，特に軽量かつ収納性に優れた特徴から，展開型の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[1].

膜面を有した宇宙構造物の問題として，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・姿勢制御の決定が難しい点である．そこで，長期運用かつ効率的な軌道・制御の決定として，膜面の形状を把握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[2]．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ってしまい，十分な推定には至っていない[3](Figure 1)．しかし，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信頼度の高いデータである．また，軌道上データをより詳細に得られることができれば，軌道上データのみで形状推定することができ効果的な軌道・姿勢の決定ができる．

そこで，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配置によって空間・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．

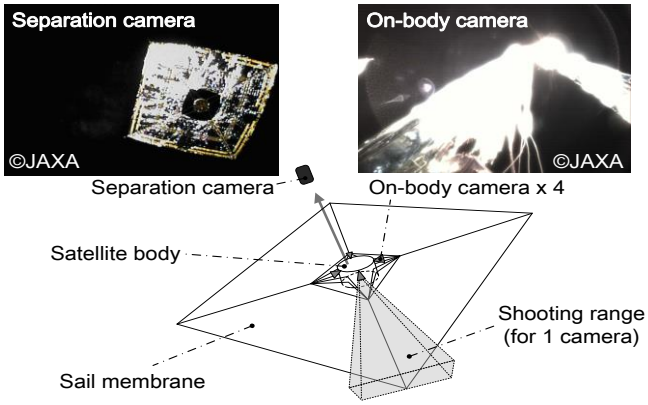

Figure 1 軌道上での膜面の計測例

1.2 目的

本研究では以下を目的とする．

・測定値の空間・時間的に断片的な計測データの推定方法の提案

より詳細な膜面形状を推定することができ，将来膜面を有した大型構造物の長期運用かつ効率的な軌道，姿勢制御のミッション要求に対応することを目指す．

2.　固有直交分解を用いた欠損推定

時間・空間的に欠損を含んだ不完全データを$x(t)$とする．欠損データを時間平均値で補完し，完全なデータに対して固有直交分解し，POD 基底ϕを求める．推定値$\tilde{x}$が式(2.1)のようにQ個のPOD基底に重ね合わせで表せると仮定する[4].

1：日本大学 宮崎・山﨑研究室　Nihon University　Miyazaki・Yamazaki laboratory

$$\tilde{x}(t) \approx \sum_{i=1}^{Q} \boldsymbol{b_i}(\mathrm{t})\phi^i(x) \qquad (2\text{-}1)$$

モード係数 b は，欠損していない部分のデータと推定値との間の式(2.2)の誤差 E を最小とするように決定する．

$$\boldsymbol{E} = \left\| \boldsymbol{x}(t) - \tilde{\boldsymbol{x}}(t) \right\|^2 \qquad (2.2)$$

求めたモード係数 b を用いて推定値 $\tilde{x}$ を求める．推定後の $\tilde{x}$ を用いて再度POD基底 ϕ を求め繰り返し計算する．誤差 E が事前に決めて微小量 ε よりも小さくなる時点で繰り返し計算を終了する．

3.　推定手法の検証

提案手法の妥当性を検証するために，真値がある実験データが必要ある．そこで，IKAROS を模した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力展開膜面の展開・計測実験を実施した．動きの大きな赤点(Figure 2)を三次元復元することで，より推定のしにくい検証をする．

Table 1 微小重力実験の概要

真空度	重力値	遠心展開膜の対角長
100[Pa]	3×10^{-2}[G]	280[mm]

Table 2 三次元復元データの概要

データ数	100800[個]
分解能	0.001[sec]

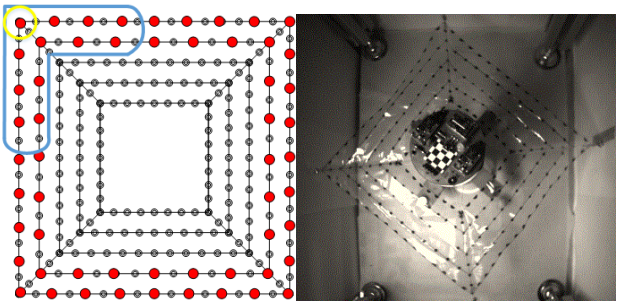

Figure 2 遠心展開膜の概要図

推定手法の妥当性を検証するために二つのパターンを試みる．

① 太陽の光で，膜面が反射し，膜面の形状がランダムに欠損する（取得データの 50%）パターン

② 取得データの一部の欠損を仮定し，Figure 2 の青く囲まれた部分の三次元データを時間的に 50%のデータが欠損するパターン

欠損パターン①，②の計算結果を膜面形状で最も推定しにくい動きをしている Z 軸で Figure 3，Figure 4 に Figure 2 の黄色で囲まれた点の三次元データで示す．

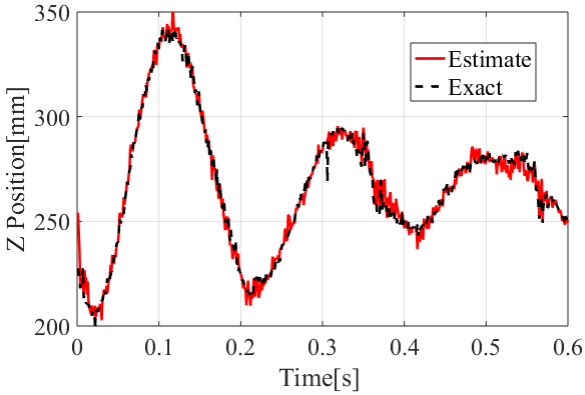

Figure 3 欠損データ①計算結果(Z 軸)

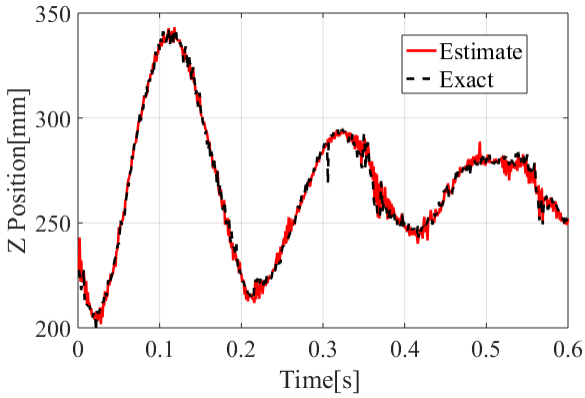

Figure 4 欠損データ②計算結果(Z 軸)

4.　考察

提案した推定方法で，欠損パターン①，②の Z 軸の推定誤差平均がそれぞれ，2.36[mm],1.90[mm]となった．IKAROS の大きさが対角線長 20[m]であるので，それぞれ 0.160[m]，0.136[m]になるので cm オーダーの形状推定に至れた．

5.　結果

・提案した推定方法で．1~2.5[mm]の範囲で推定する事が可能になった．

・提案した推定方法で IKAROS の大きさで考えても cm オーダーで推定可能である．

6.　参考文献

[1] 宇宙航空研究開発機構:「小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS 飛翔実験計画書」

[2] Toshiyuki Nishihara , Saburo Matunaga ,Osamu Mori: “Study on 3 Dimensional Reconstruction Using Separation Camera Images and Achievement of IKAROS Bases on Flight Images”

[3] 三田恭平：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展開膜面の形状推定, 日本大学修士論文, 2014

[4] R.Everson and L.sirovich:“Karhunen-Loeve procedure for gappydata”,1995