計測データと数値解析の統合による膜面展開宇宙構造物の形状推定に関する研究

A Study on Shape Estimation of Deployable Membrane Space Structure by Fusing Measurement Data and Numerical Analysis

指導教授　宮崎康行　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　M1025　　間戸場包弥

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・可展開・軽量であることが望ましく，膜面構造の利用が注目されている．2010 年 5 月には，宇宙航空研究開発機構(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 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．これらの基礎技術を利用して 2010 年代後半には直径 50m 級膜面を有する中型ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星探査ミッションが検討されている[1]．

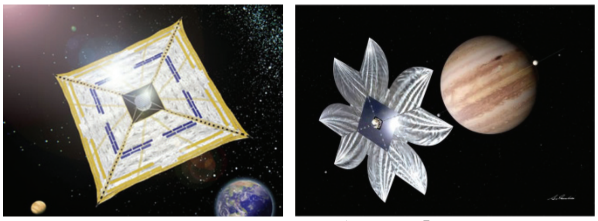


Fig.1 小型ソーラー電力セイル実証機「**IKAROS**」と中型ソーラー電力セイルによる木星探査計画

これらを実現するための課題の一つとして，宇宙空間での膜面形状を精度良く推定する技術の構築がある．膜面形状は太陽輻射圧の大きさや向きに影響を与えるため，ソーラーセイルの性能を評価する上で非常に重要となる．「IKAROS」においては，本体から分離したカメラによる膜全体の撮影や，宇宙機本体側から膜面の一部の撮影を行い，膜面状のしわを含む形状が推定された[2]．しかしながら，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を安定に解く方法として，エネルギ・モーメンタム法(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．

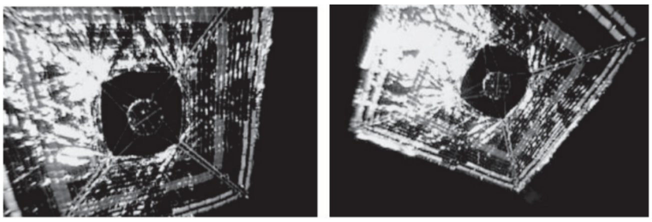


Fig.2 分離カメラで撮影した **IKAROS** の画像

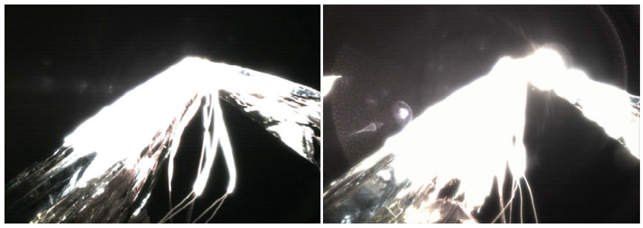


Fig.3 宇宙機本体側から撮影した **IKAROS** の画像

1.2　本研究の目的

1.1 節より，本研究では，計測データと数値解析の統合による膜面宇宙構造物の形状推定法を提案することを目的とする．計測データと数値解析の統合による膜面形状の推定法の有効性を検証するために，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と計測を行う．また，提案手法の有効性を，膜面宇宙構造物を想定した簡易モデルの数値計算例により示す．

実際，現時点では形状予測手法が確立されていないため，計測データや数値解析の一方のみから予測せざるを得ないのが現状である．一般的な膜面宇宙構造物に適用可能な計測データと数値解析を統合した形状推定法を示すことができれば，今後の膜面宇宙構造物のミッション実現に有益となる．

2.　膜面形状の計測可能な地上実験システムの構築及び計測

2.1　ステレオ視法を用いた三次元位置測定

本研究では，膜面の展開ダイナミクスを 2 台のカメラを用いたステレオ視法を用いて三次元位置の推定を行う．特に，スピン展開型の膜面宇宙構造物のような高速度運動する対象の三次元位置の推定を試みる．ステレオ視法とは，2 つの地点(計測点)から 1 点(対象点)を眺めるとき，計測点の位置と視線方向を知ることによって，対象点の位置が求まる．これは三角形の底辺(計測点間の距離)とそれを挟む角度(視線方向)が与えられれば，三角形が決定されるという性質に基づくもので，三角測量法と呼ばれる．Fig.4 に示すように，対象となる三次元座標 $P(x,y,z)$ は，2 枚の画像中の対応点座標 (x_L,y_L) と (x_R,y_R) から求まる[4]．

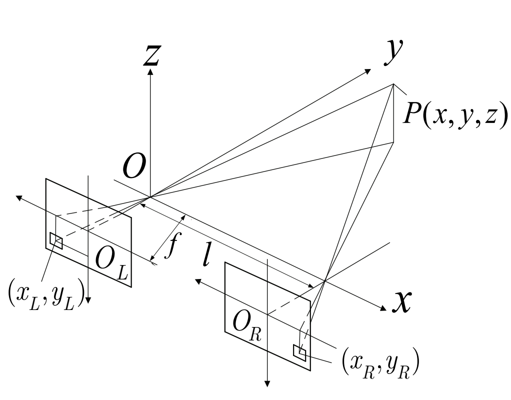


Fig.4 ステレオ視法

$$
x = \frac{x_L l}{x_L - x_R}, \quad y = \frac{fl}{x_L - x_R}, \quad z = \frac{y_L l}{x_L - x_R} \tag{1}
$$

この関係を用いて3次元座標に拡張すると観測点の同次座標の3次元座標$(X/W, Y/W, Z/W)$を以下の式で求めることができる．

$$
Q\begin{bmatrix} x^L \\ y^L \\ d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix}, with \quad Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x^{\ L} \\ 0 & 1 & 0 & -c_y^{\ L} \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & -1/T_x & 0 \end{bmatrix} \tag{2}
$$

ただし，左カメラの画像平面の座標を(x^L, y^L) ,左カメラの画像平面上の中心座標の光軸からのずれを$c_x^{\ L}, c_y^{\ L}$，視差をd，左カメラから右カメラへの並進移動をT_xとする．また，レンズの焦点距離，光学中心の位置，画素サイズの縦横比，レンズの歪みを内部パラメータ，代表とするカメラを基点としたカメラ位置・姿勢の並進・回転変換パラメータを外部パラメータと呼ぶ．古典的な手法として代表的なものには，三次元位置が既知の参照点を多数観測し，その三次元座標と等映像の二次元座標との対応関係からカメラパラメータを計算する方法がある．参照点の三次元座標を正確に設定できる場合，この手法はカメラパラメータを高精度かつ安定に推定できる．しかし，参照点を三次元空間中で高精度に設定する事は，特別の設備を要し，大型構造物を撮影する場合など，カメラの視野が大きくなると参照点を広範囲に配置するのが困難となる．よって，本研究では三次元的広がりを持つ立体ではなく二次元位置が既知の参照点を描いた平面（モデル平面）を用いる．これらのカメラパラメータの推定は，二次元位置が既知の参照点を描いた平面（モデル平面）を用いる．モデル平面（もしくはカメラ）を複数の異なる位置に動かして参照点を撮影し平面と画像面の間の射影変換を計算してカメラパラメータを抽出する．モデル平面（もしくはカメラ）は自由に動かす事ができ，その運動を知る必要はない[5] [6]．

2.2 膜面展開宇宙構造物の展開実験

2台の高速度カメラと大型真空槽を用いて，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．

膜の展開方法は,「IKAROS」と同様の展開方式を採用した．「IKAROS」の展開方式は，膜面が探査機に巻かれた状態から4本の腕を十字に伸ばす1次展開と十字の状態から完全に展開する2次展開がある．本実験では2次展開に着目し実験を行う．

2.3 実験装置

実験装置をFig.5に示す．Fig.7のように作成した膜をFig.6のように膜面を十字に折りたたんだ状態で4本のアルミ板で固定し，そのアルミ板を中心剛体下部のアクリルに固定する．中心剛体下部のアクリル板が開くことによって膜面の展開を行う．膜を回転させるモータは3Hzで回転させる．

膜の緒元をTable2に示す．また，大型真空槽緒元をTable1に，高速度カメラの緒元Table3,4を以下に示す．

Table1 大型真空槽緒元

名称	大型真空槽
材料	SUS304
到達真空度	10^{-3}Pa
サイズ	直径1800mm ×高さ1000mm

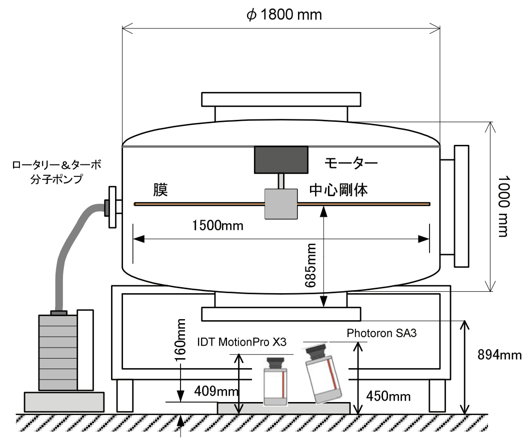


Fig.5 実験配置図

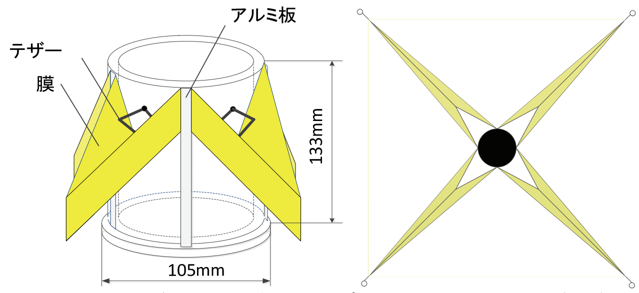


Fig.6 中心剛体(左)と膜面を十字に折りたたんだ状態(右)

Table2 膜面緒元

要素	値
膜面密度	1.42×10^3 kg/m^3
膜厚	7.5 μm
膜一辺長	0.707 m
折り幅	0.03 m
先端マス質量	1.0×10^{-3} kg

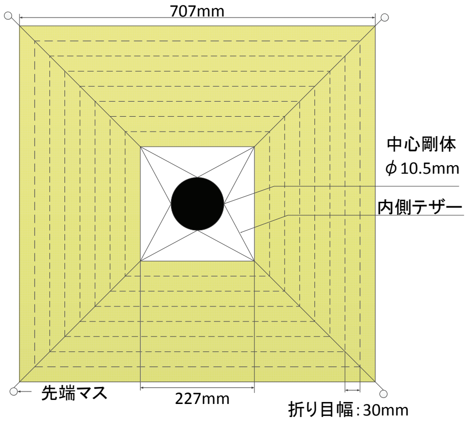


Fig.7 小型膜面モデル

Table3 高速度カメラ MotionPro X3 緒元

名称	IDT MotionPro X3
最大解像度	1280×1024　pixels
標準撮影速度	1000fps
撮影素子サイズ	15.36×12.29 mm
サイズ/重量	95×95×162 mm/1.9kg

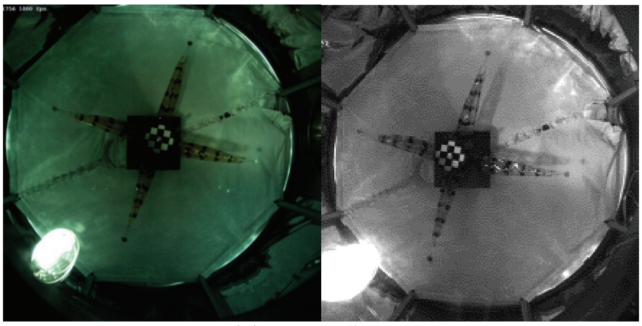
Table4 高速度カメラ SA3 緒元

名称	Photron SA3
最大解像度	1024×1024　pixels
標準撮影速度	2000fps
撮影素子サイズ	17.4×17.4 mm
サイズ/重量	120×120×215.8 mm/4.3kg

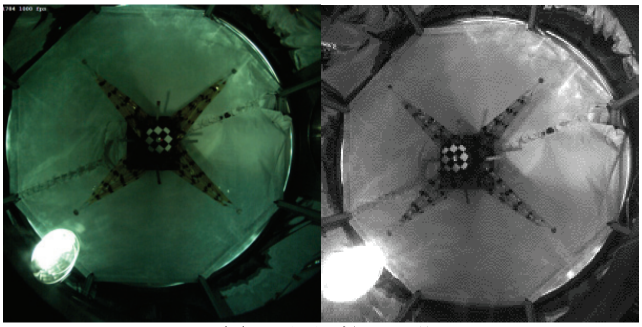
2.4　実験結果

2 次展開の様子を 2 台の高速度カメラで撮影した画像を Fig.8 に示す．次に，中心剛体に取り付けられた既知のチェスボードを使用して計測誤差の評価を行った．誤差は約 0.4mm となった．よって，本実験では，約 0.4mm の誤差で計測出来ることを示した．また，2 台の高速度カメラで撮影された画像内の特徴点を読み取り，その結果をステレオ視法を用いて三次元位置の推定を行った．Fig.9,10 に膜面上の特徴点を三次元化し，膜面の三次元形状を示した．

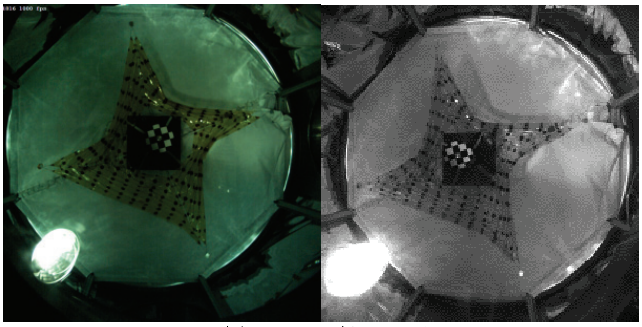
以上より，膜面形状を精度よく計測可能な地上実験システムの構築及び計測を行うことが可能となった．



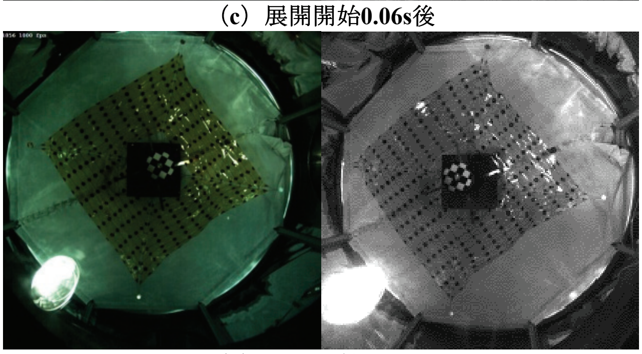
(a) 展開開始0.00s



(b) 展開開始0.03s後



(c) 展開開始0.06s後



(d) 展開開始0.09s後

Fig.8 高速度カメラで撮影した画像

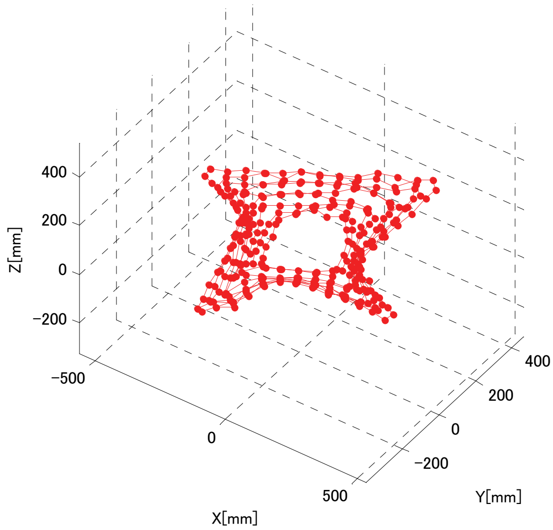


Fig.9　Fig.8（c）のステレオ視法による三次元位置推定

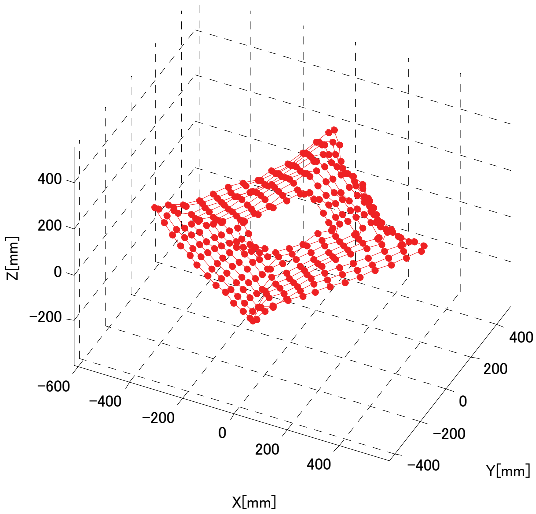


Fig.10　Fig.8（d）のステレオ視法による三次元位置推定

3.　欠損データの再構築手法の有効性の評価

3.1　Gappy POD

欠損データの再構築の手法として，Gappy POD を提案する．ある時系列データ $\boldsymbol{x}(t) \in \mathbb{R}^n, t_1 < t < t_N$ が与えられたとき，$\boldsymbol{x}(t)$ を r 次元の基底で表し，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と，基底を $\{\phi_i\}_{i=1}^{r}$ として，上述の射影は，$\Pi = \sum_{k=1}^{r} \phi_i \phi_i^T$ 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，以下を解くことで求められる．

$$
\begin{aligned}
\{\phi_i\}_{i=1}^{r} &= \underset{\{\tilde{\phi}_i\}_{i=1}^{r}}{\arg\min} \int_{t_1}^{t_N} \left\| \boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{\Pi}\boldsymbol{x}(t) \right\|^2 dt \\
&= \underset{\{\tilde{\phi}_i\}_{i=1}^{r}}{\arg\max} \int_{t_1}^{t_N} \left\| \boldsymbol{\Pi}\boldsymbol{x}(t) \right\|^2 dt
\end{aligned}
\tag{3}
$$

これは，以下の固有方程式の固有ベクトルと固有値を求める事で解ける．

$$
\begin{aligned}
&\boldsymbol{G}\phi_i = \lambda_i \phi_i,\ \lambda_1 \geq \cdots \lambda_i \geq 0 \\
&where,\ \boldsymbol{G} = \frac{1}{N}\boldsymbol{X}\boldsymbol{X}^T,\ \boldsymbol{X} = \left[\boldsymbol{x}(t_1), \cdots, \boldsymbol{x}(t_N)\right]
\end{aligned}
\tag{4}
$$

この固有値は各々の固有ベクトルがどれほど良くデータを抽出できるかを表すため，固有ベクトルを固有値の大きい順に並べ替えるものとする[7]．

次に，欠損データの再構築について述べる．与えられた時系列データに欠損部分や間違いがあるとする．初めに，マス

クベクトル $\boldsymbol{n}$ を定義する．これにより，データ $\boldsymbol{x}(t)$ における欠損や問題のある箇所をマスクで取り除くことが可能となる．

$$\begin{aligned} n_i^t &= 0 \quad if \quad \boldsymbol{x}_i^t \quad \text{is missing or incorrect} \\ n_i^t &= 1 \quad if \quad \boldsymbol{x}_i^t \quad \text{is known} \end{aligned} \tag{5}$$

このマスクを重み関数とし，$(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})_n = [(\boldsymbol{n},\boldsymbol{u}),(\boldsymbol{n},\boldsymbol{v})]$ と定義する．

$\boldsymbol{x}(t)$ が全て利用可能な時系列データであり，対応するマスクベクトル $\boldsymbol{n}$ と共に，いくつかの要素を欠損させた場合の時系列データを $\boldsymbol{g}$ とする．以下のように修正された時系列データ $\tilde{\boldsymbol{g}}$ が定義される．

$$\tilde{\boldsymbol{g}} = \sum_{i=1}^{q} b_i \boldsymbol{\phi}^i \tag{6}$$

ここで b_i は係数である．元の時系列データと修正された時系列データの残差は，以下のように定義される．

$$E = \left\| \boldsymbol{g} - \tilde{\boldsymbol{g}} \right\|_n^2 \tag{7}$$

残差 E を最小にする係数 b_i は，以下のように定義する．

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{b} = \boldsymbol{f} \tag{8}$$

ここで，$\boldsymbol{M}_{ij} = (\boldsymbol{\phi}^i,\boldsymbol{\phi}^j)_n$ と $f_i = (\boldsymbol{g},\boldsymbol{\phi}^i)_n$ である．式(8)で求めた $\boldsymbol{b}$ を式(6)で使用する[8]．

3.2　Gppy POD による欠損データの再構築

3.1 節で提案した Gappy POD による欠損データの再構築法の有効性を示す．Gappy POD の有効性の検証は，膜面宇宙構造物を想定した簡易モデルを考え，簡易モデルの一部の位置情報を欠損させた場合，Gappy POD を用いて，残りの位置情報から欠損させた位置情報が再構築出来るかを検証する．（これは，膜面宇宙構造物がカメラの幾何学的な関係から十分な撮影が出来なかった場合を想定している．）．

今回用いた膜面宇宙構造物を想定した簡易モデルを Fig.10 に示す．

膜面をケーブル要素でモデル化し，4×3 のメッシュ分割を行い，OP 面を固定し，32 自由度のモデルを構築した．また，この解析には，EMM に基づいた非線形有限要素解析を用いる．Table5 にケーブル要素の物性値を示す．

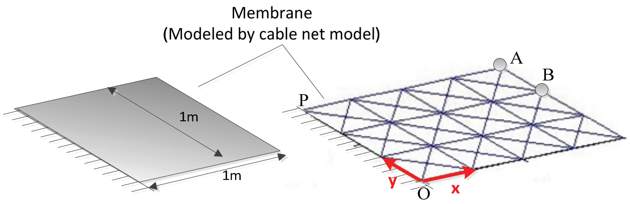


Fig.10 膜のケーブルモデル

Table5 ケーブル要素のパラメータ

要素	値
ヤング率　E	3.0 GPa
密度　ρ	1.42×10^3 kg/m^3
断面積　A	1.0×10^{-6} m^2
圧縮剛性　α	1.0×10^{-2}

簡易モデルの A 点を x，y 方向それぞれ 0.5mm 引張った状態から離した時の運動を計算した．このデータを元に膜の先端列 A，B を欠損させた場合，Gappy POD より，欠損データが再構築されるかを確認した．Fig.11 に結果を示す．

Fig.11 より，真値と推定値の相対誤差は約 0.5%で A，B 点が欠損した場合のデータが再構築できることが確認できた．これより，Gappy POD が膜面構造物に対して有効であることを示した．

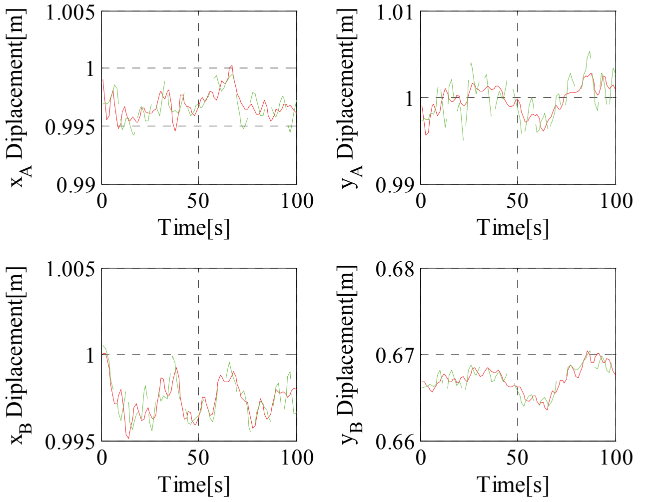


Fig.11 A,B の x,y 方向の変位の比較[真値（赤）と推定値（緑）との比較]

4.　結論

1. 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が可能であることを示した．
2. 提案手法の有効性を，膜面宇宙構造物を想定した簡易モデルの数値計算例で示した．

今後は，地上実験で使用した膜面宇宙構造物の計算モデルを作成し，その解析結果と結論 1 で得られた計測データを結論 2 で提案した Gappy POD によって，データの統合を行い膜面の形状推定を行っていく．

参考文献

[1] 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/isss2010/proceedings.shtml, 2010.

[2] 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

[3] 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.

[4] 精密工学会:画像応用技術専門委員会　画像処理応用システム　基礎から応用まで，東京電機大学出版局(2000)

[5] 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.

[6] 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，コンピュータービジョンとイメージメディア，2002

[7] 平:固有直交分解による流体解析:1. 基礎，ながれ30，2011

[8] T. Bui-Thanh and M. Damodaran, Aerodynamic Data Reconstruction and Inverse Design UsingProper Orthogonal Decomposition, AIAA JOURNAL, Vol. 42, No. 8, August 2004.