

ステレオ視による膜面展開構造物の形状推定

Shape Estimation of Deployable Membrane Structures by Stereo Vision Method

宮崎研究室

杉山 宏太, 矢野 憲悟

Abstract: In 2010, Japan Aerospace Exploration Agency launched the small solar power sail demonstrator IKAROS in orbit. In the case of IKAROS, the pictures of membrane shape taken in space with cameras separated from the main body and attached on the main body. Also, Nihon University has been developed a nano-satellite named SPROUT. SPROUT is a 20 x 20 x 22 cm amateur radio nano-satellite, launched on May 24, 2014. SPROUT will take the images of the deploying shape of membrane by two cameras. Thus the paper shows to discuss shape estimation of the ground experiment.

1. 緒 言

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 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⁾。

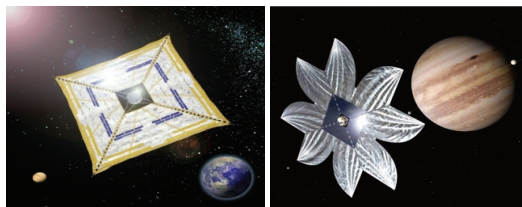


図 1 左:IKAROS,右:木星及びトロヤ群探査計画

IKAROS では、本体から分離したカメラによる膜面の撮影や、宇宙機本体側から膜面の撮影を行い、膜面形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。

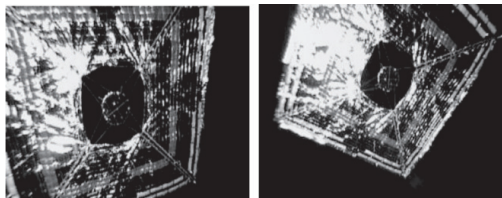


図 1 分離カメラから撮影された IKAROS の画像

本大学においても2014年5月に柔軟構造物の展開をメインミッションとした超小型人工衛星 SPROUT を打ち上げた。SPROUT ではインフレータブルチューブと膜面からなる複合膜面の展開の様子を SPROUT 本体に取り付けた二台のカメラにより得られた画像から特徴点の画像上の座標を取得し、ステレオ視によりそれを三次元座標に復元する。

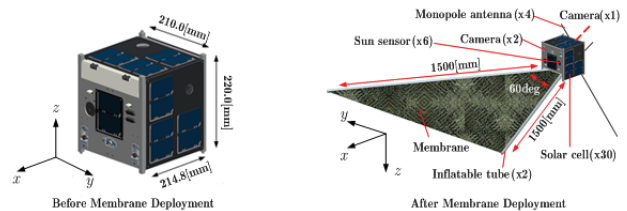


図 2 超小型人工衛星 SPROUT

2. 目 的

現在、宇宙空間での膜面形状を推定する技術の向上を目的に様々な研究・開発が行われているが、膜面構造物の地上実験は、重力・空気抵抗の微小な力による影響を強く受けるため、地上実験が困難でありデータ量が少ない。さらに、実験頻度が少ない事、スケール誤差、環境誤差の影響から定量的なデータが得られず、地上実験により運動を予測するのが困難である⁽³⁾。そこで本研究では、3節で地上実験において2台のカメラによるステレオ視法を用いて計測を行う。4節では、本大学にある真空槽や暗室での実験を想定し、大気下における超小型人工衛星 SPROUT に搭載されているカメラによるステレオ視を用いた三次元位置測定のパフォーマンスや傾向の評価を行う。5節では真空状態における地上実験数が少ないことから、本大学にある真空槽を用いて精度良く膜面を計測できる実験システムの構築及び遠心力展開膜面の三次元復元を行う。

3. 理 論

3.1 ステレオ画像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画像法を用いて三次元位置の推定を行う。ステレオ画像法とは、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)とそれをささむ角度(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。図3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

ことが出来る⁽⁴⁾。

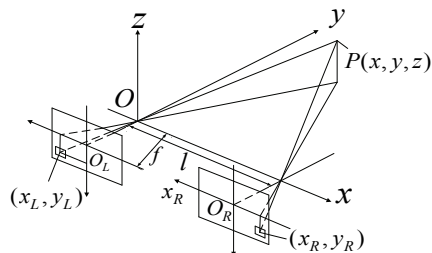


図 3 ステレオ画像法

$$\begin{cases} x = \frac{x_L l}{x_L - x_R} \\ y = \frac{f l}{x_L - x_R} \\ z = \frac{y_L l}{x_L - x_R} \text{ (or } \frac{y_R l}{x_L - x_R} \text{)} \end{cases} \quad (1)$$

上式の y 方向が対象点の奥行きであり，奥行きは視差 $d = x_L - x_R$ に反比例することがわかる．視差が大きい場合，視差の変化に対して奥行きは変わらないが，視差が小さい場合，視差が少し違うと奥行きは大きく異なる．

3.2 三次元位置.

ステレオ画像法を用いて 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．

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

ただし，左カメラの画像平面の座標を (x^{left}, y^{left}) ，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^{left}, c_y^{left} ，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⁽⁵⁾。

4. SPROUT における膜面展開実験

4.1 膜面展開実験

膜面撮影試験には，SPROUT 本体，複合膜面および地上実験用に作成した治具を用いた．配置を図 5 に示す．

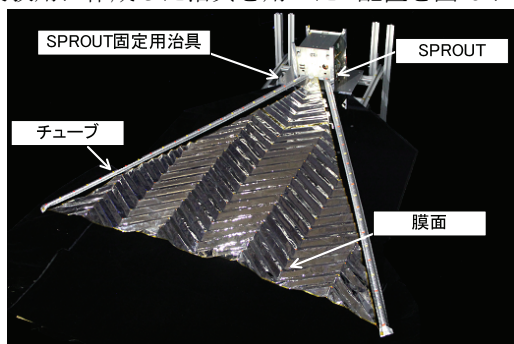


図 5 試験機器の配置図

SPROUT に搭載されている機器の位置関係を図 6 に示す．



図 6 SPROUT に搭載されている機器の位置関係
また SPROUT に搭載したカメラの諸元を下表 1 に示す．

表 1 SPROUT 搭載カメラ

外形寸法	12mm×12mm×11mm
水平画角	105°
垂直画角	78°
信号画素数	640(H)×480(V)
撮影素子サイズ	1/4 インチ CMOS イメージセンサ
電源	2.55V~3.05V
動作保証温度	-20℃~+60℃

撮影対象物である複合膜面の諸元を以下の図 7 および表 2 に示す．

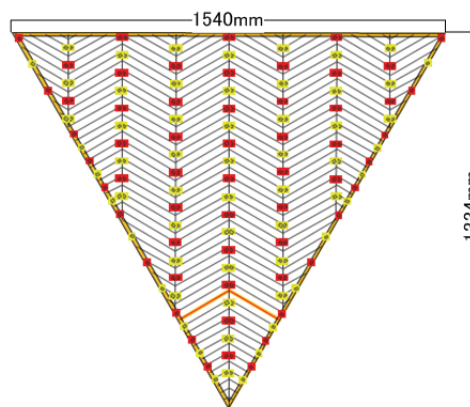


図 7 複合膜面モデル

表 2 複合膜面の諸元

膜面	材料	ポリイミド膜
	折り方	ミウラ折り
	厚さ	12.5 μm
	一辺長さ	1540mm

4.3 実験結果

SPROUT では連続した 14 枚の画像を用いて膜面の三次元形状を復元する．本実験では展開後の膜面を三次元復元できるか確認するために，SPROUT 搭載用カメラにより膜面展開後の画像を撮影し，得られた画像に

より三次元復元した。治具に沿った展開後の膜面に対して SPROUT 搭載用カメラが 50° の傾きの条件下で撮影したところ、特徴点は 129 点中 110 点読み取ることができた。傾向としては膜面の両先端の特徴点が読み取れないことを確認した。復元結果として膜面中央先端の特徴点の奥行き方向は 1178[mm] という結果が得られた。過去に同じ治具および同じカメラモジュールを用いた奥行き方向の復元誤差を見ると、衛星から 650[mm] の位置の特徴点では 2.04[mm]~5.30[mm] の誤差が確認され、1350[mm] の位置の特徴点では 1.97[mm]~42.4[mm] という誤差が確認されている。このことから衛星から遠い位置にある特徴点の方が、誤差が大きくなる傾向にあると確認できるので膜面の展開領域での奥行き方向の誤差は 42.4[mm] 以内と考えられる。SPROUT 搭載用カメラで撮影した画像を図 8 に三次元復元結果を図 9 に、図 9 のテクスチャマッピングを図 10 に示す。

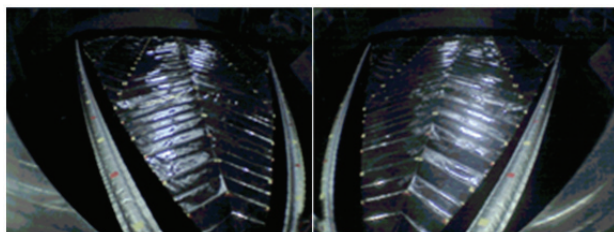


図 8 SPROUT 搭載用カメラで撮影した画像

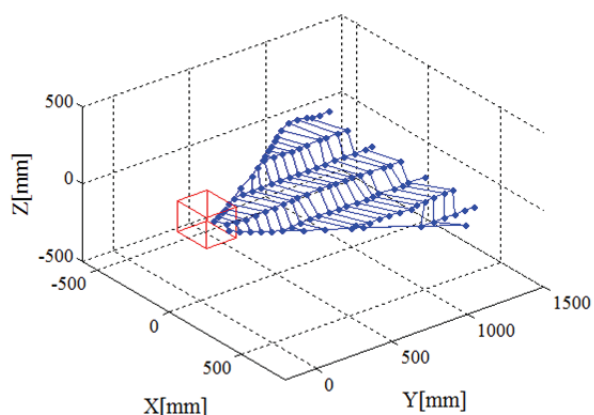


図 9 三次元復元画像

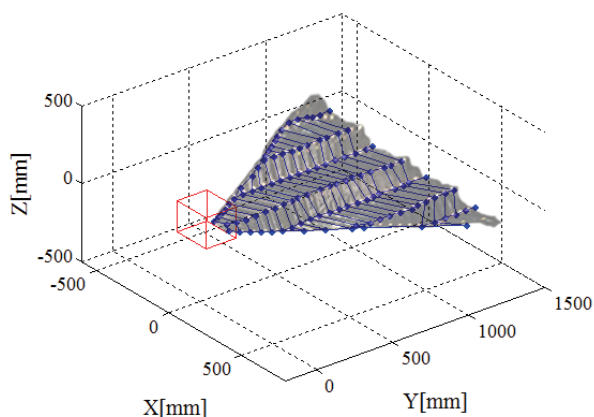


図 10 テクスチャマッピング

5. 遠心展開による地上実験システムの構築及び計測

5.1 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。大型真空槽を図 11、実験装置の配置図を図 12 に示す。膜面は、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。



図 11 真空槽

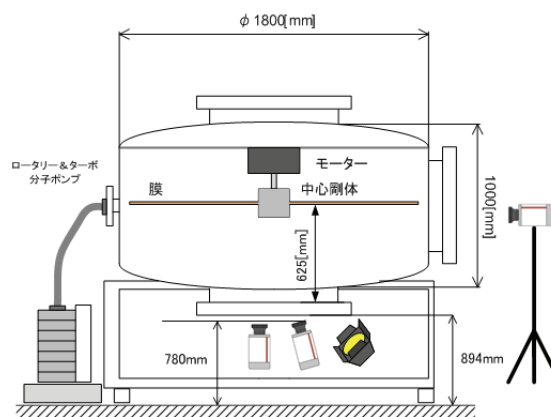


図 12 実験装置配置図

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。図 13 に作成した膜面モデルを示す。

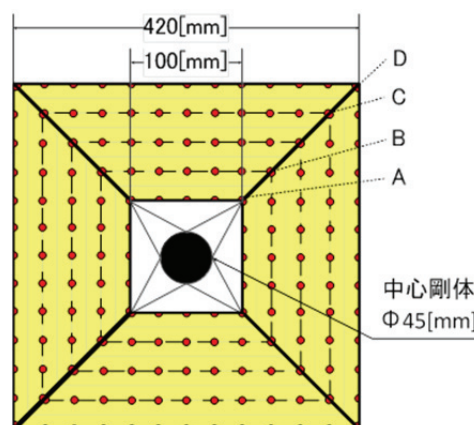


図 13 膜面モデル

5.2 実験結果

今回構築した膜面モデルにおいて、スピンレート 3[Hz],

撮影速度 1000[fps]にて実験を行った。撮影された画像の例を図 14 に示す。

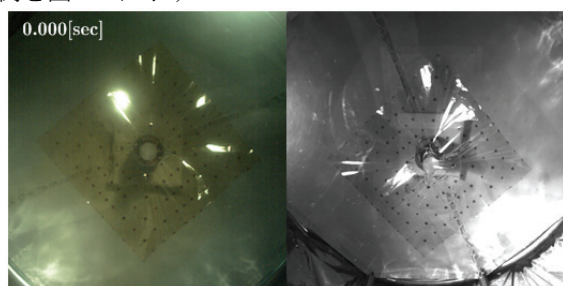


図 14 展開画像

図 14 は 10[ms]毎の計 100 枚の画像を撮影した中の 0.000[sec]における画像であり、この画像を用いて三次元位置復元をしたものを図 15 に、図 15 のテクスチャマッピングを図 16 に示す。また、復元誤差は最大で 5.13[mm]、平均すると 1.09[mm]であった。

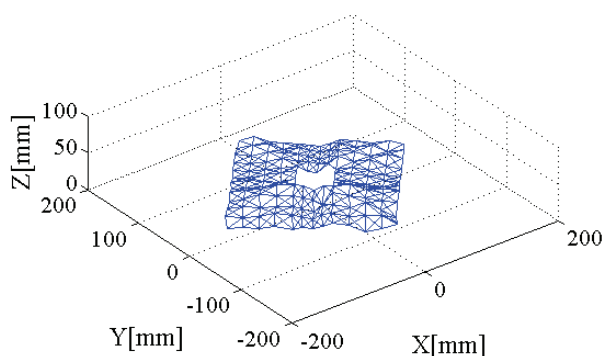


図 15 三次元復元画像

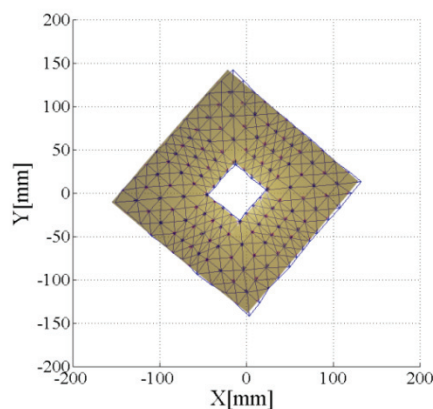


図 16 テクスチャマッピング

6. 考 察

4 節で膜面を治具に沿って進展させた為、今回の実験条件下ではカメラとの位置関係及び光学的条件で図 9 では膜面先端の形状復元が行えなかったと考えられる。これは図 8 の画像からも先端の特徴点が捉えられていないことがわかる。

5 節で行った実験で特徴点 4 点を例にとり、Z 軸方向の変位を図 17 に示す。図 17 より 20[mm]の変位を

確認できた。これは、図 15 からも見られるように膜面の外側がたわんでいることが原因だと考えられる。

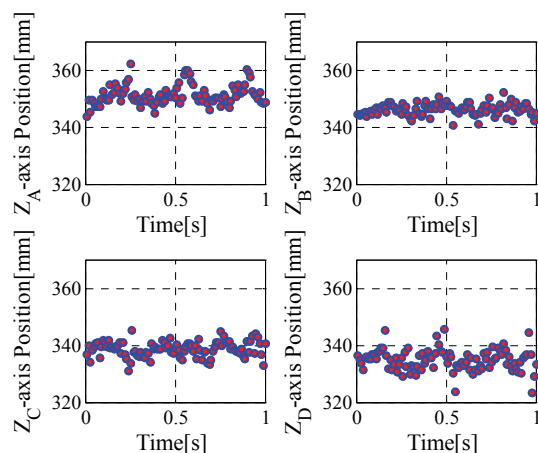


図 17 Z 軸方向の変位

7. 結 言

- ・本実験においては治具に沿った展開では膜面の先端の形状復元を行えないことを確認した。また、光学的条件による関係もあるため、今後は膜面の伸展方向と光学的条件を変え実験を行っていく。
- ・今後は 100 枚の画像を三次元復元することで、膜面の展開挙動を推定できるようになる。
- ・今後は 2 台ではなく 3 台のハイスピードカメラを用いて計測することで、より精度の高い三次元位置復元を行っていく。
- ・2 台のカメラで撮影した場合、ガラスを通して撮影しているため、今後はガラスの屈折の有無によるキャリブレーション結果を測定していく。

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/iss2010/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, Vol. 60, No. 4, pp. 167-172, Nov 2012
- (3) 三田恭平 ゴッサマー構造物の地上実験法に関する研究 ―減圧下での膜面の遠心力展開における状態推定― 日本大学理工学部卒業論文 2013
- (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) 間戸場包弥 原田貴史 大型膜面構造物の状態推定に関する研究 日本大学理工学部卒業論文 2011