

大型膜面構造物の状態推定に関する研究

—衛星搭載用カメラによる状態推定と地上実験における状態推定および検証—

宮崎研究室

間戸場 包弥, 原田 貴史

1 緒言

1.1 大型膜面構造物

近年, 大型アンテナやソーラーセイルといった大型宇宙構造物の設計・開発がアメリカやヨーロッパの機関など, 世界中で盛んに行われている. 宇宙への搬送コストの観点から, ペイロードはより小さく, より軽量であることが望ましい. このような大型宇宙構造物を実現するものとして, 薄い膜やインフレーター構造物などの膜面構造物が注目されている. 2010年, JAXA/ISAS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, 宇宙空間で帆を広げ, 太陽の光を受けて加速・航行することを世界で初めて実証した.

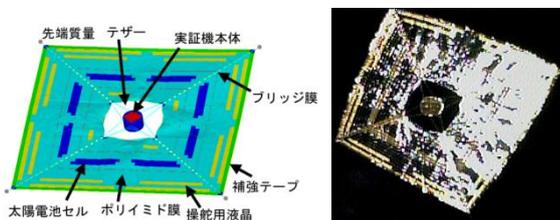


Fig. 1 IKAROS^[2]

こうした膜面構造物の動力学は重力と大気の影響を強く受けるため, 軌道への打ち上げ前に地上で構造の動特性を把握する事が難しい. そこで, 数値シミュレーション・地上実験の両方の特徴を生かして補間しながら, 宇宙空間での状態を推定することが重要となる. さらに, その後の膜面構造物の設計へのフィードバックとして宇宙での実際の状態を推定することも必要である. よって, 本研究では, 上記に関わる衛星搭載用カメラによる状態推定と地上実験における状態推定および検証を扱う. 以下, それぞれ 1.2 節と 1.3 節で述べる.

1.2 衛星搭載用カメラによる状態推定

膜面構造物は地上で折り畳んだ状態で輸送機に搭載して宇宙に打ち上げられ, 宇宙空間で膜面を展開する. 実際に展開した膜面構造物の宇宙空間での機能を確認するために, 展開中の挙動や展開後の形状を推定したいという要求がある. そういった膜面の測定手法として, ステレオ画像法やレーザー変位計を用いた手法などが挙げられる. 本研究では, これらの測定方法の中で, ステレオ画像法を用いた測定を行う. 本研究での利点は, カメラを搭載することで 3次元位置を取得することはもとより, 宇宙空間にある膜面を目視で確認できることが挙げられる.

以上を踏まえ, 本研究の目的は, ステレオ画像法による衛星搭載用カメラを用いた 3次元位置測定を精度よく行うことである.

1.3 地上実験における状態推定および検証

1.1 節を踏まえると具体的には数値シミュレーションに用いるモデルの実験による評価や, 実験データに基づく数値計算の精度向上に必要なパラメータの取得等が挙げられる. 上記を行うためには実験を行う際に, 膜面のダイナミクス測定システムが必要となる. 本研究では IKAROS のようなスピン展開型膜面構造物に対して, ステレオ画像法を用いた膜面のダイナミクス測定システムの構築を行う. 本研究での利点は, 一度に複数の点の位置を求められることや, 高速度カメラを用いて動いている点の位置の測定も可能であることが挙げられる.

以上を踏まえ, 本研究の目的は, 真空下での膜面のダイナミクス測定システムの構築及びそれを用いた大型真空槽でのスピン展開型膜面展開実験を行う

ことである.

2 理論

2.1 ステレオ画像法を用いた 3 次元位置測定

ステレオ画像法とは, 2 台のカメラを用いて観測点が異なった画像として現れることを利用した 3 次元位置を測定する手法である. 2 台のカメラを同じ高さ, 水平で画像の歪みが補正されていると仮定したとき, 対象物を撮影すると, 左右の画像で水平方向にずれが生じる. これを視差と呼ぶ. Fig.2 は, 焦点距離が f の 2 台のカメラを平行に距離 T だけ離して観測点 P を撮影したときのものである. 観測点 P は, 左画像では x^{left} , 右画像では x^{right} として撮影される. このとき, 左カメラレンズの中心 O_{left} と右カメラレンズの中心 O_{right} と観測点 P を結んだ三角形を用いて三角測量を行うことができ, 観測点 P の奥行き Z が得られる.

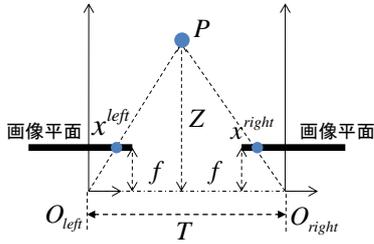


Fig. 2 三角測量

観測点 P の奥行き Z は, Fig.2 の幾何関係から以下のように表すことができる.

$$Z = \frac{fT}{x^{left} - x^{right}} \quad (1)$$

このように, 奥行きは視差 $d = x^{left} - x^{right}$ に反比例する. すなわち, 視差が大きい場合, 視差が少し違っても, 奥行きはほとんど変わらないが, 視差が 0 に近い場合, 視差が少し違ると, 奥行きは大きく異なる. つまり, 視差が小さい遠くの観測点では, 精度が悪くなり, 視差が大きい近くの観測点では, 精度が良くなる.

上記の理論を用いて以下の手順で実験を行う.

- ① 焦点距離, カメラ位置等の使用するカメラ固有のパラメータを取得. (キャリブレーションと呼

ぶ) 今回は Zhang の手法^[3]を用いた. (Zhang の手法とは, 既知の平面パターンを複数の異なる位置に動かして観測点をカメラで撮影し, 平面と画像間の射影変換を計算してパラメータを得ることである^[4]. 既知の平面パターンとして, 1 マスの長さが 24.0[mm], 内側のコーナー数が 7×10 のチェスボードを用いる.)

- ② レンズによる画像の歪みの除去.
- ③ Fig.2 のような位置関係になるように画像を変換. (平行化と呼ぶ)
- ④ Fig.2 の幾何関係から座標の計算.

2.2 3 次元位置

2.1 節の幾何関係を用いて 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.

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

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.

2.3 精度評価

本研究において, カメラにおける測定精度は, 一度に多くの高さ情報が得られるような Fig.3 に示す 3 次元形状が既知の 200[mm] \times 200[mm] の段差ゲージを用いた. また, 段差ゲージに縦 30[mm], 横 5[mm] の間隔で線を引き, 横の線を列と定義した. これらの交点を観測点とした. 段差ゲージ上に原点を設定し, そこからの Z 方向変位を測定して, 段差ゲージの真値からの差をとり誤差とした.

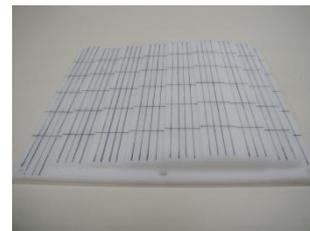


Fig. 3 段差ゲージ

Table 1 段差ゲージの高さ

	1段目	2段目	3段目	※値は 段差の 平均値 とする
高さ(mm)	4.4594E-01	2.5488E+00	4.7581E+00	
	4段目	5段目	6段目	
高さ(mm)	6.9792E+00	9.2018E+00	1.1464E+01	
	7段目	8段目	9段目	
高さ(mm)	1.0791E+01	8.1601E+00	3.5920E+00	

3 衛星搭載用カメラによる3次元位置測定実験

2台のカメラを用いて既知の物体の3次元形状と測定結果との誤差を調べることにより精度を確かめた。2台のカメラ間60[mm]と180[mm]の距離を保っている場合の撮影を行った。また、観測点がカメラレンズから200[mm]と350[mm]離れた場合の2種類を撮影した。

3.1 実験装置

実験装置は、アサヒ電子研究所製のCMOSカメラNCM03-T、段差ゲージ、チェスボードを用いた。なお、今回用いたカメラは、本学の次期超小型人工衛星「SPROUT」に搭載予定の機種である。

Table 2 NCM03-T 諸元

名称	NCM03-T
撮像素子サイズ	1/4インチ CMOSイメージセンサー
信号画素数	640(H)×480(V)
レンズ	水平画角 105°

3.2 実験方法

手順は以下の通りである。

- ① キャリブレーション用にチェスボードを撮影。
- ② 段差ゲージの測定をする対象物体の撮影。
- ③ 取得した画像の歪み補正を行う。
- ④ カメラ間の角度と距離の調整。(平行化)
- ⑤ 2つのカメラで撮影した画像から同じ観測点の画像上の座標を取得する。(視差の取得)。
- ⑥ 式(2)を用いて3次元位置の計算。
- ⑦ ⑥の結果を2.3節で述べた方法で精度を評価。

3.3 実験結果と考察

Table 3 カメラ間60[mm]の測定結果

レンズ-物体間	列	誤差平均[mm]	誤差平均/距離
200[mm]	1列目	5.20E-01	2.60E-03
	2列目	7.12E-01	3.56E-03
	3列目	5.59E-01	2.79E-03
	4列目	5.88E-01	2.94E-03
	5列目	5.48E-01	2.74E-03
350[mm]	1列目	5.09E+00	1.45E-02
	2列目	5.56E+00	1.59E-02
	3列目	6.99E+00	2.00E-02
	4列目	5.02E+00	1.43E-02
	5列目	4.97E+00	1.42E-02

Table 4 カメラ間180[mm]の測定結果

レンズ-物体間	列	誤差平均[mm]	誤差平均/距離
200[mm]	1列目	1.95E-01	9.75E-04
	2列目	2.50E-01	1.25E-03
	3列目	2.62E-01	1.31E-03
	4列目	3.96E-01	1.98E-03
	5列目	4.53E-01	2.27E-03
350[mm]	1列目	4.80E+00	1.37E-02
	2列目	4.99E+00	1.43E-02
	3列目	5.01E+00	1.43E-02
	4列目	5.18E+00	1.48E-02
	5列目	2.32E+02	6.63E-01

Table3,4のカメラ間が60[mm]と180[mm]で物体がカメラレンズから200[mm]にある場合を比較する。それぞれの観測点の3次元位置の測定値と真値との差が1[mm]以下という結果が得られた。一方、350[mm]は測定値と真値の差が約5[mm]と大きくなっていることがわかる。また、カメラレンズから物体までの距離と誤差の比も、350[mm]の方が200[mm]より約5倍大きくなっていることがわかる。これは、2.1節で述べた理論と同様の結果が実験でも確認できたことを表している。

3.4 結言と今後の課題

衛星搭載予定のカメラNCM03-Tを用いてステレオ画像法で、対象物体の3次元位置を測定することができた。また、物体をカメラレンズに近づけて撮影した方が高精度に測定できることが確認できた。今後の課題として、膜面構造物の撮影や3次元位置の状態推定の精度の向上などが挙げられる。

4 大型真空槽でのスピン展開型膜面展開実験

4.1 実験装置

2台の高速度カメラと大型真空槽を用いて、遠心回転するような膜面構造物の3次元位置の測定を行う。Fig.4のように実験装置を配置した。

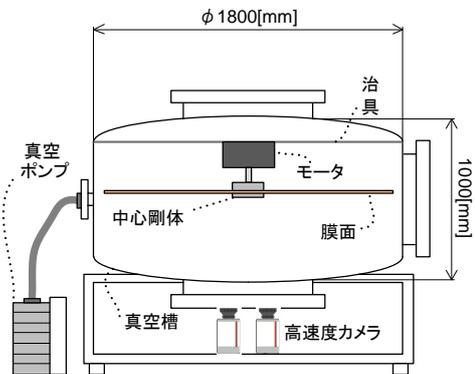


Fig. 4 実験装置配置図

Table 5 大型真空槽諸元

材質	SUS-304
サイズ	直径1800mm × 高さ1000mm
到達真空度	10 ⁻²
最大展開範囲	直径1500mm

Table 6 高速度カメラ SA3 諸元

機種	Photron SA3
最大解像度	1024 × 1024
標準撮影速度	2000fps
レンズ焦点距離	7.5mm

Table 7 高速度カメラ Motion Pro X3 諸元

機種	IDT Motion Pro X3
最大解像度	1024 × 1280
標準撮影速度	1000fps
レンズ焦点距離	7.5mm

4.2 実験方法

- ① 3.2 節 ①と同様にキャリブレーションを行う。
- ② 3.2 節②～⑦で 3 次元位置の精度を評価する。
- ③ 大型真空槽に膜面構造物を設置する。
- ④ 大型真空槽内の減圧を行う。
- ⑤ 膜面の遠心展開実験を行い、膜面の 3 次元位置を測定する。手順は 3.2 節と同様である。

なお、本研究では、①および②を行い、さらに③、④、⑤を行うための実験システムの構築およびそれによる撮影試験（非減圧）を行った。

4.3 実験結果と考察

Table 8 段差ゲージ測定

カメラ間200[mm] レンズからの距離1000[mm]	誤差平均
1列目[mm]	3.49E+00
2列目[mm]	2.54E+00
3列目[mm]	3.23E+00
4列目[mm]	2.56E+00
5列目[mm]	2.12E+00
全誤差平均[mm]	2.79E+00

本実験での 3 次元位置の推定が Table 8 に示すような誤差を持つことが分かった。高速度カメラの場合、ある特定の位置でピント（焦点距離）を合わせると、すべてのチェスボード画像でピントがあったクリアな画像を得ることが現段階で困難であったためキャリブレーションが精度良く行えなかった。この点は、光量や絞りを上手く調整していくこと等の工夫で改善可能であると考えられる。また、Fig.5

に示すように真空槽内で高速度カメラによる膜面の撮影試験を行った。真空槽には 1000[mm]角の正方形のポリイミド製の膜が設置されている。今回は膜面の 3 次元位置測定は行っていないが、Fig.5 のような画像を用いて段差ゲージを測定した方法と同様に行えば可能であると考えられる。

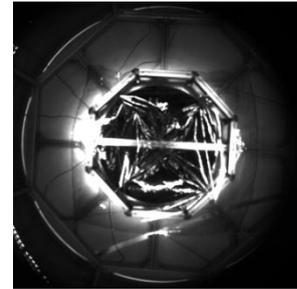


Fig. 5 高速度カメラによる膜面画像

4.4 結言と今後の課題

高速度カメラを用いて 3 次元位置の測定を行い、誤差を評価した。また、大型真空槽において膜面の実験システムを構築して撮影試験を行った。今後は、測定精度の改善に向けた工夫を行い、今回構築した実験装置を用いて、スピン展開型膜面構造物の動特性を得るための展開時や姿勢変更時の膜面の 3 次元位置の状態推定を行い、数値計算の精度向上に寄与する結果を得たいと考えている。

参考文献

[1] Gary Bradski Adrian Kaebler 松田晃一
詳解 OpenCV コンピュータビジョンライブラリを使った画像処理・認識 2009

[2] 宇宙航空研究開発機構 <http://www.jaxa.jp/>

[3] Z.Zhang A Flexible New Technique for Camera Calibration 1998

[4] 植芝俊夫 富田文明 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 2002

[5] 塩路義行 格子投影法によるメッシュ膜面の面外形状の計測 東京大学大学院 2010

[6] 山崎政彦 ゴサマー宇宙構造物の経験的モデル低次元化手法 日本大学大学院 2008

[7] 奥田恭介 早瀬亮 ソーラーセイル用薄膜面構造物の遠心力展開実験 日本大学 2008