

超小型衛星を用いた膜構造の軌道上ステレオ視計測システム

東工大 小川睦大, 坂本啓, 大熊政明
ウェルリサーチ 下田優弥, 倉富剛, 日高菜奈

概要

本研究では, CubeSat の質量・容積の制約を満たしながら $1\text{m} \times 1\text{m}$ の展開膜の面外形状を可視光のステレオ視で軌道上計測するシステムのプロトタイプを作成し, 暗室内での撮影実験により精度評価を行って, 各種パラメータの影響を明らかにする.

1. 研究の背景と目的

薄膜太陽電池などの薄型デバイスを薄膜の構造部材に貼付した膜面展開宇宙構造物 (以降, 「多機能膜構造」と呼ぶ) において, 軌道上での展開形状を推定する技術が求められている. 一辺 14m の正方形セイル膜の展開に成功した小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS (図 1) では, セイル上に薄膜太陽電池, 液晶デバイスなど複数種類の薄膜デバイスが貼付され, それらの機能を軌道上で評価を行った[1]. IKAROS 宇宙機の軌道・姿勢運動の解析[2]および分離カメラが取得したセイル画像の解析[3][4]から, セイルが面外に変形していたと推定されている. Satou ら[5]は幾何学的有限要素法解析により IKAROS セイルの面外変形の原因の一つが, セイル上に貼付された薄膜デバイスの「反り」であると推定しているが, セイル全体の面外形状が決定されるメカニズムは未だ十分に理解されていない. 将来の宇宙機で薄膜太陽電池アレイ構造などの多機能膜構造を利用する際, その軌道上での展張形状を打ち上げ前に予測する技術が必要である. その技術を確認するためには IKAROS 以外にも軌道上での多機能膜構造の形状計測を実施し, 知見を深めることが有効である.

Sakamoto, Nakanishi ら[6]は 3U CubeSat 「OrigamiSat-1」を用いて一辺 1m の正方形多機能膜を展開する宇宙実証 (図 2) を実施予定である. 展開後に膜面の面外形状を計測するミッションを行うが, 3U CubeSat の限られた容積 ($10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 34\text{cm}$) の中にバス部, 展開膜に加えて展開膜の形状計測装置を搭載することは挑戦的である. 本研究では, 可視光のステレオ視によって OrigamiSat-1 展開膜の面外形状計測が達成可能であるかを判断し, 到達しうる計測精度を見積もることを目的とする. 具体的には, CubeSat の容積の制約を充たしながら, 膜の面外形状推定精度を向上させるカメラレンズ, 撮像素子, カメラ配

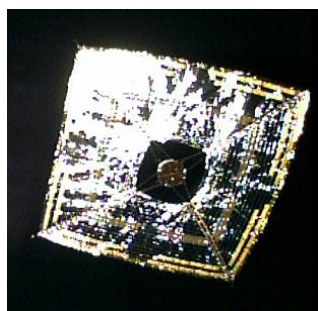


図 1 ソーラー電力セイル実証機 IKAROS (©JAXA)

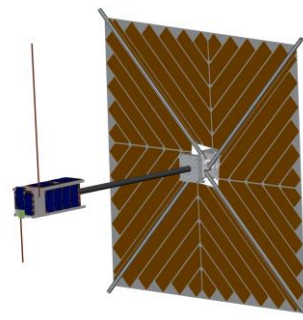


図 2 開発中の 3U CubeSat, OrigamiSat-

置, 画像処理アルゴリズム, 膜上の特徴点・照明環境, の選定・検討を実施する.

2. 計測対象と計測システムのプロトタイプ

2.1. 概要

本研究では OrigamiSat-1 の展開膜を暗室の中で撮影する実験を行いながら計測システムの評価・検討を行う. 実験環境を図 3 に示す. 計測システムのプロトタイプとして, 可視光カメラ 2 台によるステレオ視を実施する. 伸展マストによって被写体(展開膜)を最大 1m, カメラから離して撮影する. ただし, CubeSat の容積の制約から, カメラ 2 台の距離は最大 56mm しか離すことができない. 図 4 に OrigamiSat-1 の構成と, ステレオ視計測システムの模式図, 表 1 に計測システムのパラメータを示す.

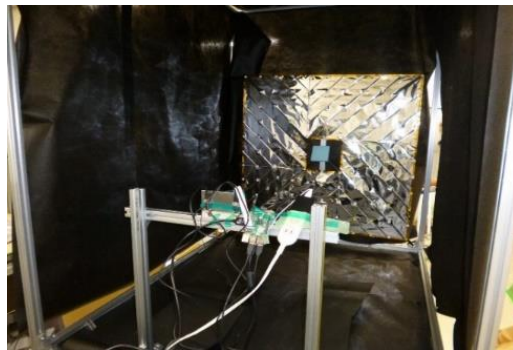


図 3 計測システムプロトタイプの評価実験環境

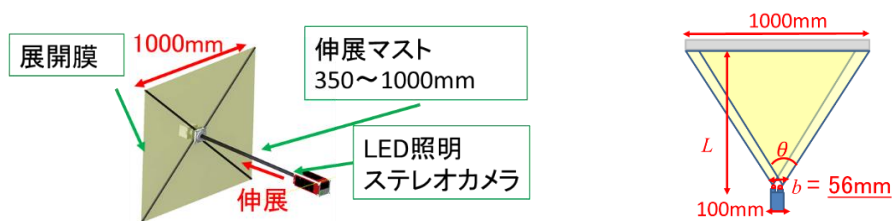


図 4 OrigamiSat-1 の構成 (左) と計測装置の模式図 (右)

表 1 計測システムの各パラメータ

| | |
|----------|--------------------------|
| 被写体サイズ | 最大一辺 1000mm 正方形膜 |
| 被写体距離 L | 伸展マストの制限より ~1000mm |
| カメラ間距離 b | 3U の制限より 56mm |
| レンズ画角 | 広角レンズ($\theta > 60$ 度) |
| | 魚眼レンズ($\theta > 180$ 度) |

以下ではステレオ計測に用いるカメラ，展開膜，評価用マーカーボード，キャリブレーション用チェッカーボードについて述べる．

2.2. カメラ

ステレオカメラとして MD5014 を選定した．撮像素子は 1/4inch であり，撮影範囲を拡大する目的で画角の大きいレンズ 2 種を選定した．図 5 に評価実験に用いたステレオカメラ，表 1 にカメラの仕様を示す．



図 5 ステレオカメラ

表 2 カメラ仕様

| | |
|------|------------------|
| サイズ | 36.7×14×14mm |
| 画像素子 | 1/4inch |
| 画素数 | 2592×1944 pixels |
| 通信 | USB2.0 |
| 接続 | microUSB |
| 消費電流 | 170mA |

2.3. 展開膜

ステレオ視計測では画像から特徴点を検出し，2 枚の画像の特徴点をマッチングさせることで三次元形状を計測する．展開膜を計測するために，その特徴点として円形のマーカーを展開膜に貼付する（図 6）．軌道上で展開膜を計測する場合は夜側で撮影することを想定しており，照明環境が不十分でも特徴点が検出しやすいように，反射回帰マーカーとコート紙のマーカーの二種類を併用して用いる．

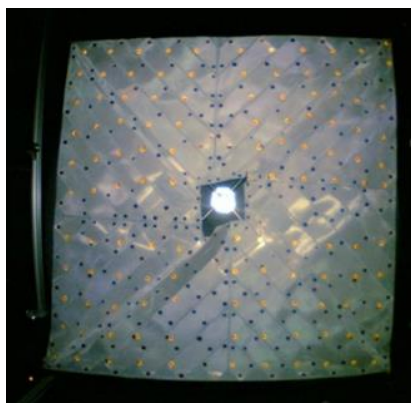


図 6 展開膜画像

2.4. 精度評価用マーカーボード

展開膜の計測に特徴点として円形マーカーを用いるが、展開膜の計測ではもとの形状が未知なため計測精度の評価には適さない。そこで平板にマーカーを貼付したマーカーボードを計測することで、計測システムの評価を行う（表 3、図 7）。

表 3 マーカーボードサイズおよび特徴点

| | |
|---------|-----------|
| サイズ | 780×720mm |
| マーカー数 | 14×13 個 |
| マーカー間距離 | 60mm |

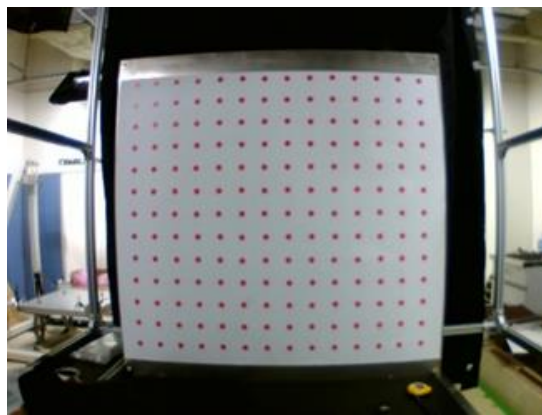


図 7 精度評価用マーカーボード

2.5. チェッカーボード

表 4 と図 3 に示すチェッカーボードをレンズ歪み補正およびキャリブレーションに使用する。

表 4 チェッカーボード仕様

| | |
|----------|---------------|
| サイズ | 712.5×487.5mm |
| 格子数 | 19×13 個 |
| 1 格子の大きさ | 37.5×37.5mm |

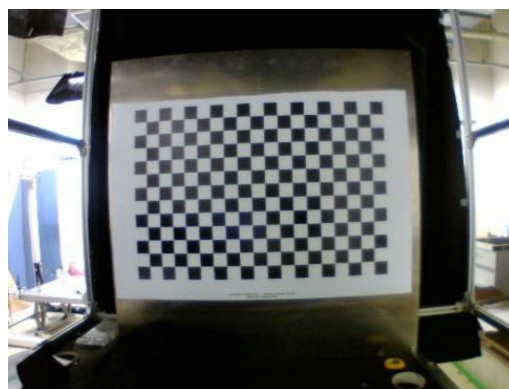


図 8 チェッカーボード

2.6. 画像処理法

OrigamiSat-1 における膜面計測システムのプロトタイプでは、文献[7][8]を参考に、以下のプロセスで面外形状の推定を行った。

- (1) チェッカーボードの計測
- (2) 歪み補正
- (3) ステレオキャリブレーション
- (4) マーカーボードの計測
- (5) ステレオマッチング

以下では(1)~(5)の概要を述べる。

(1) チェッカーボードの撮影：

レンズやカメラパラメータを同定するためにチェッカーボードの画像を複数枚用いる。使用する画像は、まずレンズパラメータ同定のため撮影範囲内を網羅的に撮影する。図 9 に示すように、撮影範囲を 9 分割し、それぞれの領域にチェッカーボードが収まるように撮影する。また、チェッカーボードの画像はステレオキャリブレーションにも用いるため、被写体距離に対しても 3 つのパターンで撮影する。9 パターンのそれぞれの領域で、被写体距離を 100mm ずつ移動させ 3 パターン撮影し、合計 27 枚のチェッカーボードを撮影する。

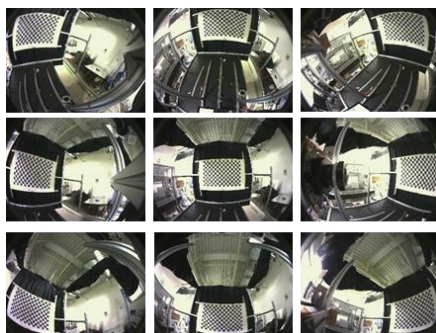


図 9 9 パターンのチェッカーボード画像

(2) 歪み補正

歪み係数などのレンズパラメータを同定することでレンズ歪みを補正し、その歪みを軽減する。本研究では Adobe Lens Profile Creator と Adobe Photoshop を使用して、レンズパラメータの同定およびレンズ歪み補正を行った。上記の 27 枚の画像から Adobe Lens Profile Creator を使用してレンズパラメータを同定した。最後に、Adobe Photoshop と同定したレンズパラメータを用いて、使用する画像の歪み補正を行った。

(3) ステレオキャリブレーション

MATLAB を用いてステレオキャリブレーションを行いカメラパラメータの同定を行う。チェッカーボード画像に歪み補正を適用した画像を使用する。

(4) マーカーボードの計測

計測システムの評価方法として、平板の計測結果から精度を求める。カメラと平行な平板に特徴点としてマーカーを貼付したマーカーボードを撮影する (図 7)。計測結果のばらつきを見るために、連続で 10 枚撮影しそれぞれの計測を行う。

(5) ステレオマッチング

上記(4)で撮影したマーカーボードの画像を、(2)の方法で歪み補正を行い、MATLAB を使用して補正した画像のステレオマッチングを行う。まず特徴点として貼付した円形マーカーの検出を行う。円の検出感度 (=0~1), 円の検出半径(pixel)を決めることで、ハフ変換により検出を行う (図 10)。2 枚の画像でそれぞれ円の検出をした後、検出した点の対応付けを行う。最後に求めた視差により、特徴点の三次元座標が推定される。

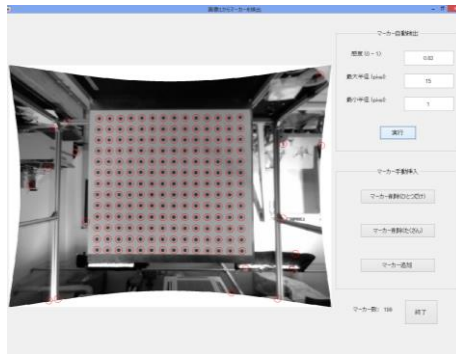


図 10 円検出結果

3. 誤差要因の抽出

本計測システムで高精度化を目指すために課題となる主な 7 つの要因を以下の通り抽出した。すなわち、(a) 画角、(b) レンズの歪み補正、(c) カメラ設置精度、(d) カメラキャリブレーション、(e) 解像度、(f) 特徴点、(g) 照明、である。

3.1. 画角

計測対象となる展開膜を画角に収めるため被写体距離を増大させること、レンズの画角を広角にすることが考えられる。マッチングさせる特徴点の読み取り誤差による三次元形状再投影結果の大きさは、被写体距離が大きくなるほどその奥行き方向の誤差も大きくなってしまふ。また、広角レンズを使用すると樽型収差による歪みが生じてしまい、広角にするほどその歪みは大きくなる。これら 2 つのパラメータには相関があり、それぞれのパラメータの最適な組み合わせを探す必要がある。本研究では、魚眼レンズと広角レンズの 2 つのレンズを使用して、それぞれのパラメータの組み合わせによる精度の比較をする。

3.2. レンズ歪み補正

レンズの歪み補正によって、特徴点のピクセルがずれることがあり、その影響が計測結果に影響する (図 11)。次章では歪み補正を行わないときの結果と歪み補正を行ったときの結果を比較し、精度の向上を評価する。



図 11 歪み補正前 (左) と歪み補正後 (右) のチェッカーボード画像

3.3. カメラ設置精度

本研究の計測システムは CubeSat 搭載の条件を満たすため、カメラの基線長、撮像素子などが一般的なステレオ視計測システムに比べ小さい。一方で、OrigamiSat-1 であれば 1000mm 四方の展開膜を計測する必要があるため被写体距離が大きくなる。つまり、幾何的にサイズの小さい計測装置を用いた被写体距離の大きい計測システムである。このため、カメラの相対位置、相対角度などの設置精度による計測結果への感度が大きい。このようなカメラ設置精度などの系統誤差の大きさを次章で、チェッカーボードの計測結果により評価する。

3.4. カメラキャリブレーション

カメラパラメータは使用するチェッカーボードの画像に依存しているため、画像により結果が異なる。そのため、使用するチェッカーボードの画像を変えたとき、それぞれで同定したカメラパラメータを用いたチェッカーボードの計測結果を比較することで、キャリブレーションによるばらつきの大きさを評価する。

3.5. 解像度

使用する画像の解像度を 2048×1536 , 1024×768 , 640×480 の 3 種類で行い計測結果を比べてみたが、明確な精度の差は見られなかった。特徴点が十分に大きいため、1 pixel あたりの画像範囲の変化が、特徴点検出に影響しなかったためだと思われる。そこで今回の計測には 1024×768 の画像のみを使用する。

3.6. 特徴点

計測対象となる展開膜を形状計測するため、特徴点として円形のマーカーを使用した。大きさは、半径 8mm, 15mm, 20mm を使用し結果を比較したが、8mm では特徴点として検出漏れが起きやすく、また 15mm と 20mm では結果に差が見られなかった。そこで本研究では 15mm のマーカーを使用する。マーカーボードではコート紙を材料としたマーカー使用し、展開膜にはガラス片を含んだ反射回帰マーカーとコート紙のマーカーを併用して計測を行う (図 12)。

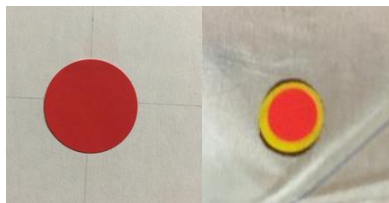


図 12 マーカーボードに貼付したマーカー (左) と展開膜に貼付したマーカー (右)

3.7. 照明

軌道上での計測は暗闇環境であるため、照明環境も考察する必要がある。本研究では展開膜の計測の際 LED を 1 つ使用する。

4. 計測の高精度化の提案・評価

4.1. 概要

第 3 章で精度に影響する主要な 7 つ要因を取り上げたが、1~3 についてはその影響の大きさが不明なため、本章でより詳しく検討を実施する。すなわち、

- (i) 歪み補正による計測結果の精度への影響
- (ii) 魚眼レンズと近距離、広角レンズと遠距離のそれぞれの組み合わせによる計測結果の精度への差

(iii) カメラ設置精度による計測結果の精度への影響

これら3つの誤差要因についての検討後、検討を踏まえたうえで最も精度の良い結果を示す。

計測結果の精度の評価指標として以下を用いる。計測結果として計測点の三次元座標を得られるが、それらの奥行き方向の値（z座標）の

1. 標準偏差（フィッティング面からの標準偏差）
2. 平均値

の2つの値を用いて評価する。計測結果のばらつきを「標準偏差」とし、被写体距離を「平均値」として評価する。

4.2. レンズ歪みの影響の評価と低減

今回使用したレンズは広角レンズ（画角 84 度）と魚眼レンズ（画角 190 度）であり、どちらもレンズ歪みによる精度への影響が見られるため、まず広角レンズに対して歪み補正による精度への影響を示す。まず、広角レンズ（画角 84 度）の歪み補正無し/有りの結果の比較を図 13 と表 5 に示す。被写体距離 1000mm のマーカーボードを計測した。

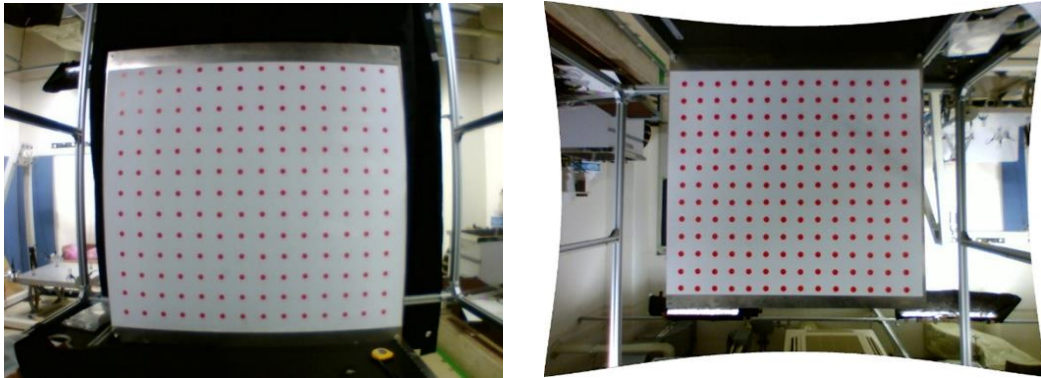


図 13 歪み補正無しマーカーボード画像（広角レンズ）（左）と歪み補正有り計測結果（広角レンズ）（右）

表 5 歪み補正有り・無し結果比較表（広角レンズ）

| | 補正無し | 補正有り |
|----------|--------|----------|
| 標準偏差 | 13.0mm | 10.1mm |
| 被写体距離 | 1001mm | 1006.2mm |
| 被写体距離の誤差 | 1mm | 6.2mm |

歪み補正によって標準偏差が 2.9mm 減少したが、被写体距離の誤差は 5.2mm 増大している。標準偏差の向上は、レンズによって歪んで並んでいたマーカーが直線に並んだことによりばらつきが抑えられたためと思われる。しかし被写体距離の誤差は増大してしまっているが、これは歪み補正により画像が縮小されるため、その影響で奥行き方向にずれてしまったことによる結果と思われる。

次に、魚眼レンズ（画角 190 度）を用いて同様の計測を行った。被写体距離は、魚眼レンズで 1000mm 四方膜が画角に収まる限界の距離として、363mm とした。魚眼レンズは歪みが強く、歪み補正をせずにステレオマッチングすることはできなかった。このとき平面形状の推定精度は標準偏差 13.9mm であり、被写体距離の誤差は 37mm と大きな値となった。

表 6 に歪み補正有りの広角レンズと魚眼レンズの結果の比較を示す。ばらつきとして標準偏差は 3.8mm の精度の向上が見られた。また、魚眼レンズでは被写体距離の誤差が 37mm と大きな値となった。これは広角レンズの場合と同様に画像が縮小したことによると思われる、魚眼レンズの歪みが強い分、縮小率が高くなり誤差が大きくなったと思われる。

表 6 レンズ別比較結果

| | 魚眼レンズ (画角 190 度) | 広角レンズ (画角 82 度) |
|----------|---------------------|--------------------|
| 標準偏差 | 13.9mm | 10.1mm |
| 被写体距離 | 326.0mm | 1006.2mm |
| 被写体距離の誤差 | 37mm | 6.2mm |

4.3. カメラ設置精度の影響の評価と低減

チェッカーボードの特徴点は格子点であることから読み取り誤差は小さく、レンズ歪み補正による誤差は計測点が同一平面内に存在するという拘束条件から小さいと予想すると、チェッカーボードの計測結果はカメラなどの計測装置の設置誤差の影響だと予想される。ノミナルの計測（a パターン）を実施した後に b パターンとして、カメラの固定マウント部分に厚さ 0.2mm の紙を挟み、再度チェッカーボードの計測を行った。

表 7 カメラ設置誤差によるチェッカーボードの計測結果比較

| | a | b |
|---------|----------|----------|
| 標準偏差 | 0.0012mm | 0.0011mm |
| 被写体距離 | 988.2mm | 1000.3mm |
| X 軸回り角度 | 1.3 度 | 1.4 度 |
| Y 軸回り角度 | 1.2 度 | 1.6 度 |
| Z 軸回り角度 | 0 度 | 0 度 |

表 8 カメラ設置誤差によるマーカボードの計測結果比較

| | a | b |
|----------|----------|---------|
| 標準偏差 | 10.1mm | 10.8mm |
| 被写体距離 | 1006.2mm | 982.7mm |
| 被写体距離の誤差 | 6.2mm | 17.3mm |

以上2つの a, b パターンのチェッカーボード、マーカボードの計測結果を表 4.14, 4.15 に示す。カメラの設置誤差により、チェッカーボードやマーカボードのどちらも被写体距離は変わっているが、標準偏差は変わっていない。これは、カメラ設置誤差は計測点一つ一つのばらつきに影響を与えない系統誤差だからである。チェッカーボードは読み取り誤差が小さく計測点が同一平面内にあるという拘束条件があり、またカメラ設置誤差がチェッカーボードの結果に大きく影響を与えたことから、チェッカーボードの計測結果はカメラ設置誤差による系統誤差に近い値であるといえる。

4.4. 構築した展開膜形状ステレオ計測システムの評価

以上の計測結果についてまとめると以下となる。レンズ歪みによる補正により標準偏差 2.9mm の改善が見られた。また、魚眼レンズを使用したものに比べ、広角レンズは標準偏差 3.8mm の精度の差が見られた。さらに、チェッカーボードの計測結果を用いることによってカメラ設置誤差による系統誤差を求めた。そこで、レンズ歪み補正を行い、広角レンズを用い、カメラ設置誤差による系統誤差は計測結果から差し引くこととする。これを実施した結果、本計測システムのマーカボード計測における最終的な精度は表 9 のとおりとなった。

表 9 計測システムプロトタイプのマーカーボードによる精度評価結果

| | |
|----------|----------|
| 標準偏差 | 5.3mm |
| 被写体距離 | 1003.2mm |
| 被写体距離の誤差 | 3.2mm |

5. 結論と今後の課題

CubeSat の質量・容積の制約を満たしながら、1m×1m の展開膜の面外形状を可視光のステレオ視で計測する計測システムのプロトタイプを作成し、暗室内での撮影実験により精度評価を行って、各種パラメータの影響を評価した。結果として、被写体距離 1000mm 平面板を標準偏差 5.3mm で計測できるステレオ計測システムが構築できた。その過程で、レンズ歪み補正による精度の向上を示し、また使用するレンズ、被写体距離の精度への影響を明らかにした。カメラ設置誤差については3次元形状計測結果への感度が高いが、打ち上げ前のキャリブレーションにより誤差の除去が可能であることを示唆したが、今後、その再現性について、より詳細な検討が求められる。

6. 謝辞

本研究の実験の遂行にあたり，東京理科大学の木村真一先生，および ISAS/JAXA ソーラーセイルワーキンググループの皆様から，さらに東京工業大学の中西洋喜先生，日本大学の山崎政彦先生を始めとする OrigamiSat-1 開発メンバーから，多くの助言をいただきました．本研究の一部は平成 26 年宇宙航空科学技術推進委託費（課題名「革新的宇宙科学を切り拓く先進展開構造の研究・開発拠点形成」）の支援のもと実施しました．ここに記して謝意を表します．

7. 参考文献

- [1] H. Sawada, et al., "On-orbit Result and Analysis of Sail Deployment of World's First Solar Power Sail IKAROS," Journal of Space Technology and Science, Vol. 27, No. 1, 2013, pp. 54-68.
- [2] Y. Tsuda, et al., "Generalized Attitude Model for Spinning Solar Sail Spacecraft," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 36, No. 4, Jul.-Aug. 2013, pp. 967-974.
- [3] 北村ら，「IKAROS 搭載カメラ画像を用いた膜面形状推定」，航空宇宙技術, Vol. 2, 2013, pp. 47-55.
- [4] 知識ら，「分離カメラ画像の陰影による IKAROS の膜面形状推定」，日本航空宇宙学会論文集, Vol. 60, No. 4, 2012, pp. 167-172.
- [5] Y. Satou, et al., "Nonflatness of Solar Sail Membrane Predicted by Nonlinear Finite Element Method," AIAA-2014-0832, presented at 2014 AIAA Science and Technology Forum and Exposition (SciTech 2014), Jan. 13-17, 2014.
- [6] H. Sakamoto, H. Nakanishi, et al., "CubeSat Design for Space Demonstration of Deployable Membrane Structure Technologies," 2015-f-74, presented at 34th International Symposium on Space Technology and Science, July 4-10, 2015.
- [7] J. J. Rodriguez, et al., "Stochastic Analysis of Stereo Quantization Error," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 12, No. 5, 1990, pp.467-470.
- [8] J. Heikkila, et al., "A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction," Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997, pp. 1106-1112.