

超小型衛星搭載用カメラによる 形状推定の誤差及び精度評価

Evaluation of Error Range and Accuracy of Shape Estimation by Stereo Vision Using Two Low-Pixel Cameras for Pico-Satellite

宮崎研究室
丸木 悠暉

Abstract: The main mission of the pico-satellite SPROUT is the deployment of the combined membrane structure which consists of a triangular membrane and two inflatable tubes attached at the two sides of the membrane. In this mission, two low-pixel cameras are used for the shape estimation of the membrane by the stereo vision method. The error range and the accuracy of the shape estimation is evaluated in this study.

1. 緒言

1.1 柔軟構造物の宇宙利用と形状推定

宇宙開発において輸送には多大なコストがかかり、その上打ち上げ可能な重量及び体積は制限される。そこで宇宙構造物においては軽量且つ展開性、収納性に優れた柔軟構造物が注目されている。例として、大型展開アンテナやソーラーセイルがある。2010年には、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。

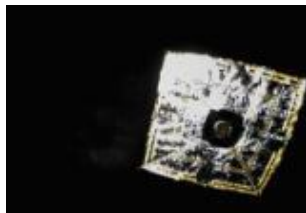


Fig.1 分離カメラの撮影画像

IKAROS では膜面の画像取得を、本体側面のカメラと機体から分離した子機のカメラから行った。分離したカメラには Fig. 1 のように膜面全体を撮影することに成功し、その画像から特徴点の抽出することで膜面の展開形状を推定している。

1.2 柔軟構造物の設計事情

柔軟構造物の地上試験の難解さから設計時の妥当性実証が難しく、開発が進み辛い面がある。対策として数値予測手法の向上が挙げられている。近年、数値予測と共にその比較対象として、膜面の形状推定に関する研究が盛んに行われている^[1]。

1.3 超小型衛星 SPROUT における形状推定

現在、日本大学では柔軟構造物の展開をメインミッションとした超小型衛星 SPROUT の開発を行って

いる。SPROUT ではインフレータブルチューブと膜からなる複合膜面の展開の様子を、二台の小型カメラを用いたステレオ視により計測する。

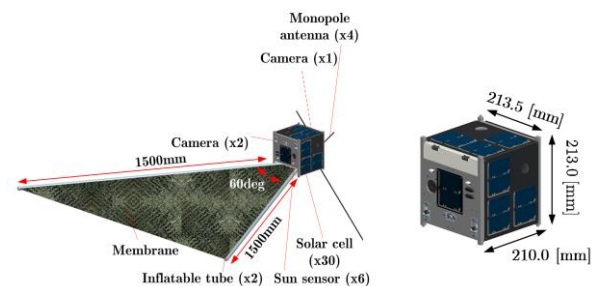


Fig.2 超小型衛星 SPROUT

SPROUT に搭載するカメラは小型で低画素且つレンズ歪みが大きい。そのため事前に計測機器としての性能を知ることは必須である。

2. 目的

本研究では以上に述べた背景を踏まえ、現在開発中の超小型衛星 SPROUT における形状推定の誤差及び精度の測定を目的とする。

なお、カメラの誤差及び精度評価は過去になされているが、それはカメラから 350mm まで離れた対象物についてのみであり、SPROUT の複合膜面は展開時に約 1330mm の奥行きを持つことから、さらなる検証が必要である^[2]。

3. 理論

3.1 座標系定義

本研究では x, y, z 軸の定義を、
x 軸：膜の伸展方向に垂直かつ膜面に平行な方向
y 軸：膜の伸展方向
z 軸：膜面に垂直な方向

とする。

3.2 二台のカメラを用いたステレオ視^{[2][3]}

ステレオ視とは、2台のカメラで撮影した画像面に、投影された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かつ水平に設置し、画像の歪みが補正されていると仮定する。この時、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。この視差を利用することで、三角測量の原理から対象物の三次元位置を復元することが可能となる。

Fig.3 に示すように、光軸が平行な2台のカメラが、一定の距離 l を隔てて設置され、各カメラの画像面がそれぞれのカメラの投影中心から f だけ離れた三次元空間中の同一平面にあるとする。

またカメラ画像面上への注目物体の投影位置を左右のカメラ座標系で表し (x_{left}, y_{left}) , (x_{right}, y_{right}) とすれば、視差は $d = x_{left} - x_{right}$ である。以上に挙げたパラメータより、幾何学的な関係を用いれば、対象物 P の座標の各軸成分は次のように求めることができる^[4]。

$$\begin{cases} x = \frac{x_{left}l}{d} \\ y = \frac{fl}{d} \\ z = \frac{y_{left}l}{d} \text{ or } \frac{y_{right}l}{d} \end{cases} \quad (1)$$

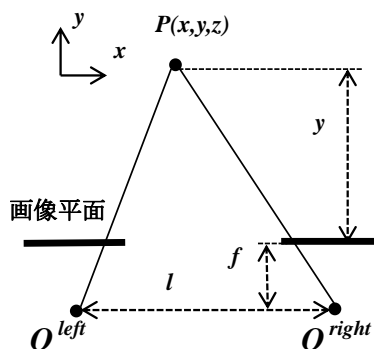


Fig.3 ステレオ視の幾何学的原理

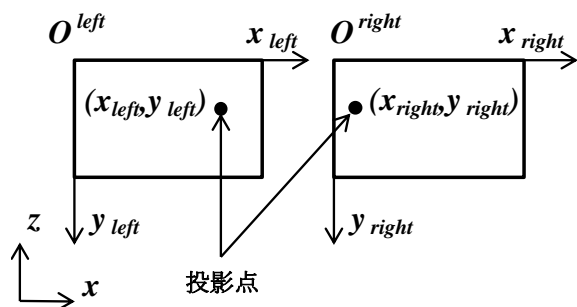


Fig.4 画像平面におけるカメラ座標系と z-x 軸

なお、実際にはカメラのレンズ歪みを含めたカメラの内部パラメータの影響があったり、カメラ配置をずれなく平行にすることが難しいなどの要因のために、(1)式のみでは大きな誤差が生じてしまう。特にSPROUTに搭載するカメラは歪みの大きいものを使用している。よって後述するカメラキャリブレーションが必要になる。

3.3 カメラキャリブレーション^[2]

カメラキャリブレーションとは、画像生成過程のモデル化を行った際の各種パラメータを推定するための方法であり、カメラ固有の焦点距離などの情報を含む内部パラメータと、カメラの位置や姿勢の情報を含む外部パラメータを求める処理である。

本研究では、比較的精度がよく簡易なカメラキャリブレーション手法である Zhang の手法を用いた。この手法は既知の平面パターンを複数の異なる位置で撮影し、平面と画像間の射影変換を計算してカメラキャリブレーションを行うものである^{[5][6]}。



Fig.5 キャリブレーション用の平面パターン

4. 実験方法

4.1 実験手順

ステレオ視の誤差及び精度評価に必要な手順は以下の通りである。

- ① カメラキャリブレーション用画像及び精度評価用対象物の撮影
- ② カメラキャリブレーション
- ③ 特徴点の読み取り
- ④ 三次元位置復元

4.2 撮影方法

➤ y 方向誤差について

衛星構体から 50 [mm] の位置に基準点を設置し、対象物を、基準点からの距離を 100 [mm] 刻みに大きくしていきながら撮影する。1350 [mm] まで撮影を行う。対象の床に設置する角を特徴点として扱う。

➤ x, z 方向誤差について

衛星構体から 550, 950, 1350 [mm] の位置に、構体面と平行にチェスボードを設置し撮影する。

Fig.6 に y 方向誤差計測用の撮影の様子を示す。



Fig.6 y 方向誤差計測用の撮影

4.3 実験装置

本研究で用いた衛星搭載カメラの諸元を Table 2 に示す.

Table 2 NCM03-T 諸元

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

対象物は x,z 軸方向の誤差値については平面パターンを, y 軸方向の誤差値については木材の立方体を用いた.



Fig.7 撮影対象の立方体

5. 実験結果

5.1 カメラキャリブレーション

カメラキャリブレーションにより得られたピクセル誤差は Table 3 の通りである.

Table 3 ピクセル誤差

ピクセル誤差	x [pixel]	y [pixel]
左側カメラ	0.309	0.289
右側カメラ	0.336	0.316

また, Table 3 よりピクセル誤差の大きいものを採用し, 1[pixel]とピクセル誤差に相当する実際の距離を table 4 に示す.

Table 4 1[pixel]ごとに含まれる距離

	1pixel ごとの長さ		ピクセル誤差	
	x [mm]	z [mm]	x [mm]	z [mm]
カメラとの距離				
200[mm]	0.81	0.67	0.27	0.21
550[mm]	2.24	1.86	0.75	0.59
950[mm]	3.87	3.21	1.30	1.01
1350[mm]	5.50	4.56	1.85	1.44

5.2 誤差値の算出

誤差の算出式は x_0, y_0, z_0 を真値として次の通りである.

$$\begin{cases} \sigma_x = |x - x_0| \\ \sigma_y = |y - y_0| \\ \sigma_z = |z - z_0| \end{cases} \quad (2)$$

Fig.8,9,10 には各軸方向の誤差推移を示す. また Fig.11 には y 座標における誤差の平均, 最大及び最小値を示す(ただし, $-120 \leq x \leq 120, 0 \leq z \leq 160$). 各軸方向の誤差の算出については, 基準位置を決定しておき, その基準位置の座標と対象の座標から二点間の距離を算出し, 真値との差をとって求めている. x 軸方向の誤差については $x = 0$ [mm]を基準として選んでいるため, そこでの誤差が 0[mm]となっている.

また, Fig.9,10 では生じ得る誤差の最大値として, 1[pixel]にピクセル誤差を加えたピクセル値に相当する距離を図中に示している.

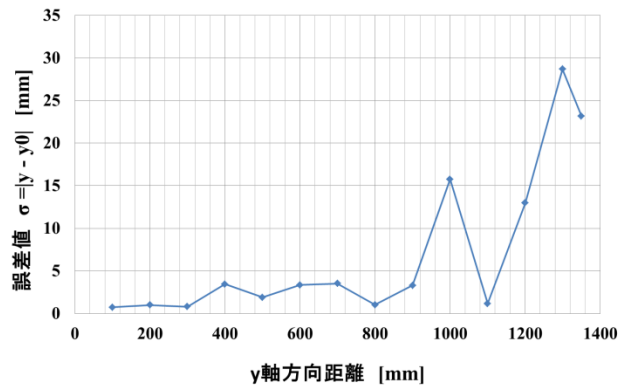


Fig.8 y 軸方向の誤差推移

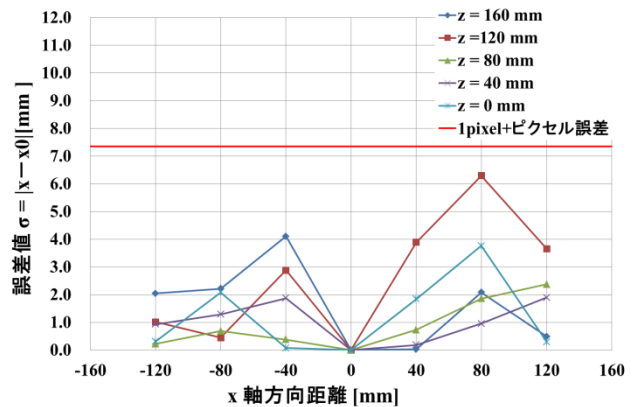


Fig.9 x 軸方向の誤差推移
(膜展開時における先端位置 $y = 1350$ mm)

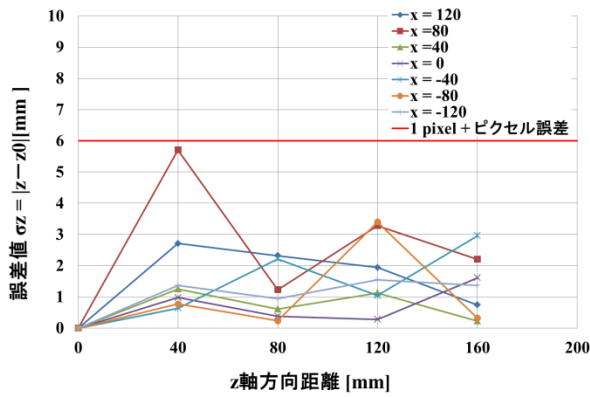


Fig.10 z 軸方向の誤差推移
(膜展開時における先端位置 $y = 1350$ mm)

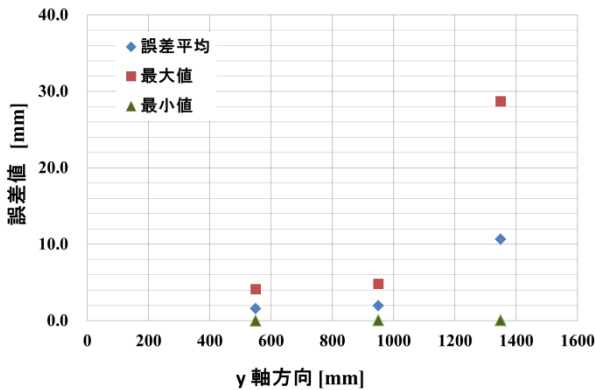


Fig.11 y 座標における誤差の平均値と
最大値及び最小値

6. 考察

Fig.8~10 を見ると、y 軸方向は 1000 [mm] 付近で著しく誤差値が大きくなり、x,z 軸方向では共に $x = 80$ [mm] 地点で大きな誤差が生じた。

誤差値にはカメラキャリブレーション時のパラメータ抽出と特徴点の読み取り時の 2 つの要因が考えられる。前者はピクセル誤差として与えられる。また後者については特徴点の読み取りをピクセル単位で行った場合、通常では 1 [pixel] 以内の点は読み取れないため、Table3 で示すような値がそのまま誤差となり得る。以上より、誤差として理論的な値の総和はピクセル誤差と 1 [pixel] に相当する距離の和で与えられると考えられる。Fig.9,10 共にその誤差値を下回ることができた。

また、本研究では宇宙での特徴点の見え方の考慮をしていない。撮影は全て蛍光灯の下で行っている。膜面展開を行うのは日陰の予定であり、パワーLEDの光を便りに撮影する。よって暗室に置いて検証していく必要がある。

精度については、Fig.11 に示す通り、 $y = 550,950$ [mm] では最大・最小値の差が小さく、精度は良いと言えるが、 $y = 1350$ [mm] においては差が大きく、精

度の悪い結果となった。精度の算出については、さらに撮影時の光の加減によって特徴点の読み取り誤差がどう変わるのか、ランダムに光を当ててみるなどの実験が考えられる。

誤差及び精度の向上については、カメラキャリブレーションの方法または、特徴点の読み取り方法の改善を行うことが挙げられる。具体的には、特徴点の読み取りを、輝度勾配を利用したサブピクセル処理により行う方法である。遠くのものほど 1 [pixel] に含まれる長さは大きくなるのだから、 1 [pixel] よりも小さな単位で検出できれば、それだけ誤差は減る。しかし、遠くのもの程ぼやけが生じるため、これをどう克服していくかが課題である。

7. 結言

- 超小型衛星 SPROUT 搭載カメラを用いたステレオ視の各軸方向の誤差及び、y 軸方向での精度の評価を行った。
- 今後は光の当たり方の影響による誤差及び精度の評価をしていく。
- 精度向上のため、サブピクセルオーダーの処理法を模索していく。

参考文献

- [1] 松尾雄太郎, 古谷寛, 照度差ステレオ視による形状計測における基準平面を用いた誤差低減法, 日本大学, 第 28 回宇宙構造材料シンポジウム 2012 年 12 月
- [2] 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, 2011 年
- [3] 佐藤 淳, 電子情報通信学会『知識の森』3 章 三次元位置幾何解析, HP <http://www.ieice-hbkb.org/>
- [4] 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展開における状態推定—, 日本大学, 2012 年
- [5] Z.Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration, 1998
- [6] Jean-Yves Bouguet, Camera Calibration Toolbox for Matlab, HP http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/