

# カメラ画像による三次元位置・姿勢復元

## 3-Dimensional Position and Attitude Reconstruction by Camera Image

宮崎研究室  
中嶋 克也, 木田 明憲

Abstract: This paper proposes a calculation method of three-dimensional position and attitude of the target point by stereo vision. This method can be applied to the reconstruction of the deformed shapes of flexible space structures by using on-board camera images and to the analysis of their dynamic behavior on orbit. The proposed method is verified by microgravity experiments of the deployment of an inflatable membrane structure by parabolic flight.

### 1. 諸言

近年、薄い膜面やインフレータブル構造物といったような極めて柔軟な展開構造物、ゴッサマー構造物と人工衛星の構体のような剛性の高い構造からなる Fig.1 のような膜面宇宙構造物が注目されている。膜面宇宙構造物は軽量にも関わらず、宇宙の軌道上で展開することによって非常に大きな面積を確保することが可能であるため、ソーラーセイルやサンシールド、大型通信アンテナなどの構造様式として期待されている。

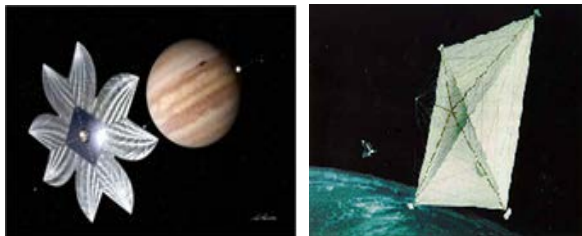


Fig.1. 膜面宇宙構造物の例<sup>[1]</sup>

宇宙に物資を打ち上げるには、その重さに応じ、莫大なコストがかかるが、ゴッサマー構造物は軽量で高収納であり、宇宙空間で展開をすることで重量・体積に比べて大きな面積を確保することが可能であり、大型構造物の軽量化・小型化が可能である。しかし、主として膜面で形成される膜面宇宙構造物は、圧縮に対する剛性をほとんど持たず、圧縮力が作用した場合、非常に簡単にその形状を変えてしまう。そのため、地上では重力・大気の影響で精度のよい実験を行うことが難しく、またコンピュータによる数値解析では、膜面構造物の挙動が複雑なため数値計算に膨大な時間がかかる。形状を維持するための技術や、膜面を展開する技術の開発など克服すべき問題が多い。

### 2. 目的

本研究では、柔軟構造物の課題である宇宙空間で

の膜面形状を精度よく推定する技術の構築を目指す。具体的には、軽量かつ可展開な薄い膜面やインフレータブル構造物といった極めて柔軟な構造物が微小重力下での展開時の形状をカメラ画像から推定する手法を提案し、実験によりその手法を検証することを目的とする。

### 3. カメラ画像を用いた位置推定理論

本研究では 2 つのオンボードカメラを用いたステレオ画像法で位置推定を行う。本節ではその理論を示す。

#### 3.1 ステレオ画像法

ステレオ画像法とは、2 つの地点(計測点)から 1 点(対象点)を眺める時、計測点の位置と視線方向を知ることによって、対象点の位置が求める手法である。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、三角測量法の一つである。Fig.2 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、(1)式を求めて求めることができる<sup>[3]</sup>。

つまり、(1)式により、対象点のカメラ座標系  $O-x-y-z$  での座標を求めることができる。

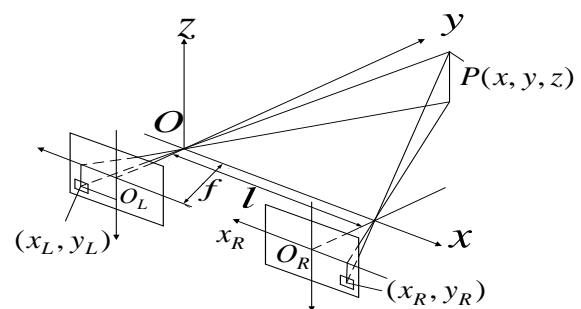


Fig.2. ステレオ画像法

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x_L l}{x_L - x_R} \\ y = \frac{fl}{x_L - x_R} \\ z = \frac{y_L l}{x_L - x_R} \text{ (or } \frac{y_R l}{x_L - x_R} \text{)} \end{array} \right. \quad (1)$$

(1)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 カメラ座標系と3次元物理座標系

3.1 節ではカメラ座標での対象点の座標を求めたが、実際には、3次元物理空間内のある点を原点とした座標系での3次元物理座標を求めたい場合が多い。この場合、カメラ座標系と、3次元物理空間との相対関係が問題となるが、一般に、Fig.3 のように、カメラ座標系に対する物理空間の相対的な位置・姿勢は、回転と平行移動とで表すことができる。

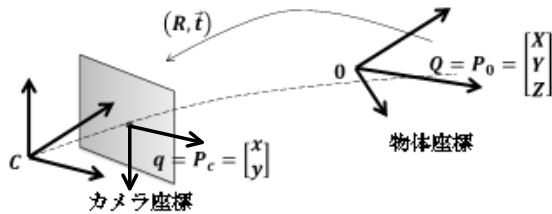


Fig.3. カメラ座標系と物理座標系の相対関係

実際、3次元空間における回転は、各軸を回転軸とし、その軸上での座標値だけは変化しないような2次元の回転に分解できる。  $x, y, z$  軸回りにそれぞれ  $\psi, \phi, \theta$  だけ順次回転させる場合 ( $z$  軸回りに回転を行い、次に  $y$  軸回りに回転を行い、最後に  $x$  軸回りに回転を行う)、結果として得られる回転行列  $\mathbf{R}$  は(2)式に表すことができる。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & \sin\psi \\ 0 & -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

並進移動量  $t_x, t_y, t_z$  を用いて平行移動ベクトル  $\mathbf{t}$  は(3)式のように表わせる。

$$\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]^T \quad (3)$$

これらを用いると、物理空間での座標  $\mathbf{Q}$  は、カメラ座標  $\mathbf{q}_c$  と回転行列  $\mathbf{R}$  および並進ベクトル  $\mathbf{t}$  によって(4)式のように表すことができる。

$$\mathbf{Q} = \mathbf{R}\mathbf{q}_c + \mathbf{t} \quad (4)$$

### 3.3 カメラキャリブレーション

カメラキャリブレーションとは、座標のわかっている物体を実際のカメラで撮影し、その画像からカメラの位置姿勢や特性を推定し、カメラモデルのパラメータとして算出することである。キャリブレーションによって算出されたパラメータは外部パラメータと内部パラメータに分類される。外部パラメータはカメラの三次元空間における回転・平行移動のパラメータであり、ステレオ画像においては一方の画像を基準として他方の回転・平行移動を表す。これらの関係式は、3.2 節において、「カメラ座標系」と「3次元物理座標系」を、「カメラ1の座標系」と「カメラ2の座標系」に置き換えれば求められる。

内部パラメータとは焦点距離・レンズ歪み係数・画像主点位置・画像サイズのレンズやカメラそのものの特性を表す。具体的には、内部パラメータ行列とは物理世界上の座標をカメラ座標へと変換する行列であり、焦点距離  $f$ 、カメラの中心光軸からのずれ  $c$  を用いて(5)式のように表す。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

カメラの外部パラメータ、内部パラメータを求めることは3.1 節で述べたステレオ画像法を用いた三次元位置測定に必要となる。

以上で示した内部パラメータおよび外部パラメータをまとめてカメラパラメータと呼ぶ。

### 3.4 三次元位置座標

3.1 節でステレオ画像法を用いて2枚の平面画像から三次元位置を推定できることは述べた。この関係を用いて3次元座標に拡張すると観測点の同時座標 ( $X/W, Y/W, Z/W$ ) 求めることができる。左のカメラと右のカメラを、3.3 節の左のカメラ行列  $\mathbf{M}_{rect}^{left}$  と左の投影行列  $\mathbf{P}^{left}$ 、右の  $\mathbf{M}_{rect}^{right}$  と右の  $\mathbf{P}^{right}$  を組み合わせて、カメラ座標からクリップ座標へと変換する。

$$\mathbf{P}^{left} = \mathbf{M}_{rect}^{left} \mathbf{P}^{left} = \begin{bmatrix} f_x^{left} & 0 & c_x^{left} \\ 0 & f_y^{left} & c_y^{left} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$P^{right} = M_{rect}^{right} P^{right} = \begin{bmatrix} f_x^{right} & 0 & c_x^{right} \\ 0 & f_y^{right} & c_y^{right} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

この投影行列は式(8)のように同次座標の3次元の点を2次元の同時座標の点へと次元を減らす。

$$P \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで2次元座標は $(x/w, y/w)$ として計算できる。2次元の点も、その2次元座標とカメラの内部行列が与えられると3次元に再投影できる。この再投影行列は(9)式に示す。

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x^{left} \\ 0 & 1 & 0 & -c_y^{left} \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & -1/T_x & (c_x^{left} - c_x^{right})/T_x \end{bmatrix} \quad (9)$$

よって、(10)式を用いて3次元に投影できる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} x^{left} \\ y^{left} \\ d \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ with } Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x^{left} \\ 0 & 1 & 0 & -c_y^{left} \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & -1/T_x & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

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運動を $T_x$ とする<sup>[5]</sup>。

#### 4. 微小重力実験

本手法の妥当性を検証するため、微小重力実験を行い、実際に3次元座標の復元を行った。以下にその概要を示す。

##### 4.1 実験概要

JAXA 主催「第11回航空機による学生無重力実験コンテスト」にて、航空機のパラボリックフライトにより、人工的に機内に微小重力環境を作り出し、インフレータブル膜構造物の展開実験を実施した。Table 1 に本実験の条件を示す。また、機内で使用した実験装置概略図を Fig.6 に示す。

Table 1. 実験条件

微小重力時間	約 25SEC
機内圧力	約 0.8 気圧
機内温度	約 20~25°C
実験回数	10~15 回程度
実験ラックサイズ	600mm×500mm×500mm

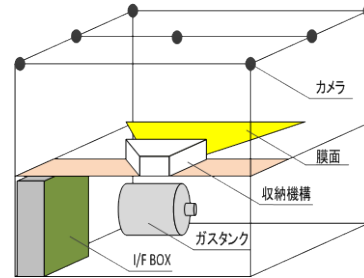


Fig.6. 実験装置概略図

実験では、微小重力下でのインフレータブルチューブおよび複合膜面に取り付けたターゲットマーカー（以下、特徴点と呼ぶ）を付し、展開中の特徴点の動きを捕捉し、その時々刻々の3次元座標を復元した。Fig.7 にインフレータブルチューブおよび膜面の画像を Fig.8 に特徴点振り分け図を示す。



Fig.7. インフレータブルチューブおよび膜面

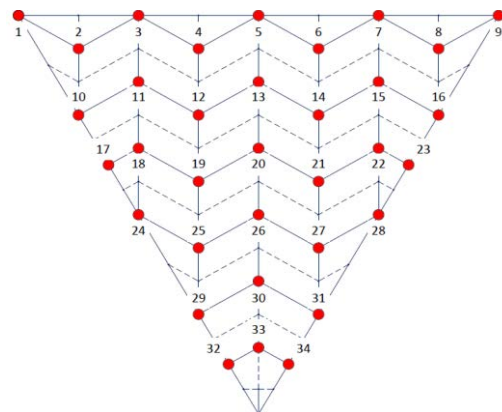


Fig.8. 特徴点振り分け図

## 4.2 実験方法

実験は以下に示す手順で行った。

- ① 3.3節で述べたカメラのキャリブレーションを行う。
- ② 各実験機器を閉じた筐体内に収納する。
- ③ 航空機側から発信される微小重力状態開始信号を検知し、自動シーケンスにより膜面展開が開始される。
- ④ 筐体上部に設置されたカメラ 7 台により特徴点を捕捉する。
- ⑤ 得られた特徴点のカメラ画像により三次元復元を行う。

## 4.3 実験結果

Fig.9, Fig.10 にカメラで撮影された 450mm 八角形折りのインフレータブルチューブと 440mm 正三角形折りミウラ折りの膜面の左右の画像と左前右前の画像を示す。また、Fig.11 にカメラで撮影された画像より 3.1 節で述べたステレオ画像法を用いた三次元位置の測定を行った画像を示す。

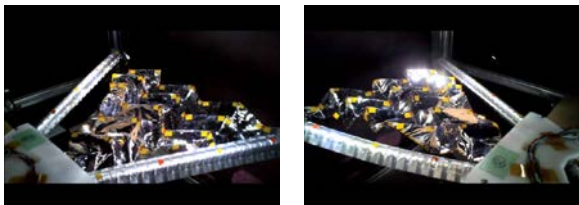


Fig.9. 左前と右前インフレータブルチューブと膜面

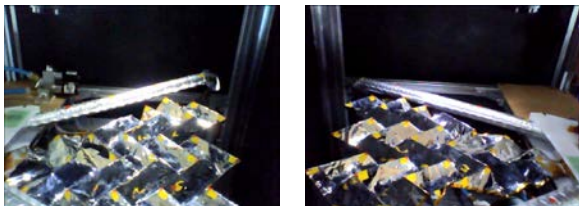


Fig.10. 左と右インフレータブルチューブと膜面

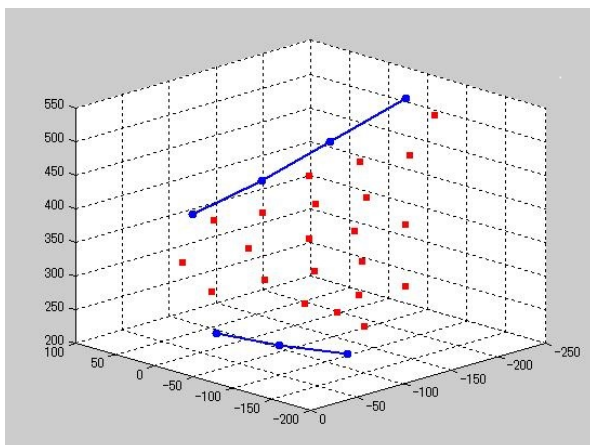


Fig.11. 三次元復元図

## 5. 考察

膜面の三次元復元の行う際、途中で画面外に消えてしまう特徴点があり一部始終を追うことが出来ない。その場合、別の 2 台のカメラで追尾を図る必要があった。カメラの校正を再度行い、消えている特徴点だけ追尾を行うことで解決した。

## 6. 結言

インフレータブルチューブ・複合膜面の微小重力化での展開は成功し、展開の様子をカメラで撮影することができた。

カメラを用いて、カメラキャリブレーションを行い、パラメータを導出することを確認した。導出したパラメータを用いて、ステレオ画像法により膜面の三次元位置測定を行った。

ここまで、微小重力化での膜面の三次元位置の測定結果を述べてきたが、真空実験の結果や数値計算と合わせて、複合的な軌道上挙動を推定していき、地上実験から軌道上挙動推定法を確立していく。

今後は、校正画像枚数と復元精度の関係や露光時間と運動速度による復元精度を考察していく。

## 参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構アーカイブス  
[http://www.jaxa.jp/archives/db/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/archives/db/index_j.html)
- [2] Camera Calibration Toolbox for Matlab,  
[http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)
- [3] 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
- [4] 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック制作チーム OpenCV プログラミングブック 第 2 版 OpenCV1.1 対応 株式会社毎日コミュニケーションズ 2009
- [5] 間戸場包弥 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 日本大学 2013
- [6] 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 2013