

ステレオ視法を用いた膜面形状の計測精度評価と固有直交分解を用いた欠損計測データの再構築

Measurement accuracy evaluation of Deployable Membrane Structures by Stereo Vision Method & Reconstruct a Measurement Missing Data by Proper Orthogonal Decomposition

宮崎・山崎研究室

Miyazaki・Yamazaki Laboratory

河添祥司, 弘中寛之

Shoji Kawazoe, Hiroyuki Hironaka

Currently, membranous structure has deployed on the orbit. Membranous structure deployment is measured using camera. Stereo method is One of the measurement technique using the camera. Stereo method is obtained a wide range of measurement data. However, Stereo method might not be obtained accurately by measurement error and missing data. In this paper, it has written about reconstruct a missing data and evaluation of measuring accuracy

1. 緒言

1.1 背景・目的

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、軽量かつ展開性、収納性の優れた柔軟構造物が注目されている。例として、2010年JAXAによって打ち上げられた小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS は、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^[1]。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、膜面上のしわを含む形状が推定された。

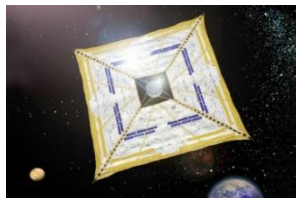


Figure 1 IKAROS

このように、軌道上の構造物の展開や展開後の様子を計測するために、カメラを用いた計測方法が行われており、ステレオ視法もその1つの計測手法である。しかし、IKAROS は、センサやカメラの配置、精度制限や、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。そこで本研究では、ステレオ視法を用いた膜面形状の実用的な計測法を構築するために、ステレオ視法の計測精度の評価と、軌道上で生じる膜面形状の計測欠損データに対応するための欠損データの再構築方法提案する。

1.2 アプローチ

柔軟構造物の形状推定に必要なデータは、計測点の位置に関するデータであり、位置を計測する手段としてステレオ視法を用いる。そこで本研究では、ステレオ視法を用い、以下の2つのアプローチより目的達成を目指す。

I. ステレオ視法の精度評価：ステレオ視法における、計測精度とカメラから測定面までの距離の関係を検討するために奥行き方向に変化を与え計測実験を行い、奥行き方向

への精度、誤差を評価する。また得られたデータから誤差の補正方法を検討する。

II. 欠損データの再構築：地上実験データを用いて欠損したデータを作り、欠損データの再構築を行う。再構築したデータと元データ結果を比較し、提案した理論の有効性を示す。

2. 理論

2-1 ステレオ視法

ステレオ視法とは2つの視点から計測点を眺めるとき、視点の位置と視線方向を知ることによって、計測点の位置が求まる。これは視点間の距離とそれをはさむ角度（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。Figure 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_R, y_R) と (x_L, y_L) から求まること出来る。

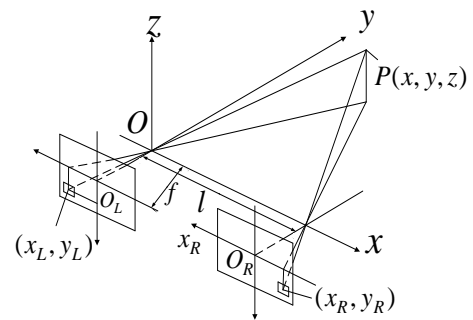


Figure 2 Stereo Method principle

$$\begin{cases} x = \frac{x_L l}{x_L - x_R} \\ y = \frac{f l}{x_L - x_R} \\ Z = \frac{y_L l}{x_L - x_R} \text{ (or } \frac{y_R l}{x_L - x_R} \text{)} \end{cases} \quad (2.1)$$

2-2 固有直交分解を用いた欠損データの再構築

固有直交分解(POD)とは、与えられた多次元データから低次元成分を抽出する分解方法である。すなわちデータを最も効率良く展開できるように基底を求める手法である。

ここで時系列データが与えられたとする.

$$\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n, t_1 < t < t_N \quad (2.2)$$

$\mathbf{x}(t)$ を r 次元の基底で表して, もとの n 次元の基底に戻した際に残差が最小となるようにする. ここでいう基底を $\{\varphi_k\}_{k=1}^r$ とすると, 数学的には以下のように与える.

$$\mathbf{P} = \sum_{k=1}^r \varphi_k \varphi_k^T \quad (2.3)$$

となり, これはデータの分散を一番大きくとれる方向にデータを射影することと同等である. この基底は次の最適化問題を解くことで求められる.

$$\begin{aligned} \varphi_k \quad r_{k=1} &= \arg \min_{\varphi_k} \int_{t_1}^{t_N} \|\mathbf{x}(t) - \mathbf{P}\mathbf{x}(t)\|^2 dt \\ &= \arg \max_{\varphi_k} \int_{t_1}^{t_N} \|\mathbf{P}\mathbf{x}(t)\|^2 dt \end{aligned} \quad (2.4)$$

ここで \mathbf{P} は, 以下のように与える.

$$\mathbf{P} = \sum_{k=1}^r \varphi_k \varphi_k^T \quad (2.5)$$

ここで, 不完全ベクトル $\mathbf{x}(t)$ から完全または「修復」ベクトルを再構成する必要があると仮定する. 次のように Q 個の POD 基底関数の点で復元ベクトル $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ を表すことができると仮定すると以下のように与えられる.

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) \approx \sum_{i=1}^Q \mathbf{b}_i(t) \varphi^i(x) \quad (2.6)$$

ここで $\varphi^i(t)$ は $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ の固有関数であり, POD 基底の係数 \mathbf{b}_i を計算するには復元ベクトル間の誤差 \mathbf{E} を最小化する必要がある. 誤差は以下のように定義されている.

$$\mathbf{E} = \|\mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)\|^2 \quad (2.7)$$

誤差 \mathbf{E} を最小化する POD 基底の係数 \mathbf{b}_i は順に式(2.6)を微分することで求められる.

$$\mathbf{M}_{ij} \mathbf{b}_i = \mathbf{f}_j \quad (2.8)$$

\mathbf{M}_{ij} は, $\mathbf{M}_{ij} = (\varphi^i, \varphi^j)$, \mathbf{f}_i は, $\mathbf{f}_i = (\mathbf{x}(t), \varphi^i)$ である. 式(2.8)より \mathbf{b}_i を解き, 式(2.6)を用いて復元ベクトル $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ を得られる. 復元した $\mathbf{x}(t)$ は $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ に対応する修復要素によって $\mathbf{x}(t)$ に不足している要素に置き換えることによって再構築される. 再構築されたデータを再びタイムステップ分上記の方法で POD 基底の係数 \mathbf{b}_i を求め, 繰り返し計をすることで POD 基底の係数 \mathbf{b}_i は収束していく. 収束した \mathbf{b}_i の値を用いて再構築したデータが欠損データのないデータと近い値が得られる.

3. 実験①

3-1 実験概要・実験装置

ステレオ視法における, 計測精度とカメラから測定面までの距離の関係を検討するために奥行き方向に変化を与え計測実験を行う. また, Zhang の手法を用いてカメラキャリブレーションを行った^[2]. これらから, 得られた計測値を補正する手法を考案し, 補正出来るかどうかの検証を行った.

Figure 3 に実験装置を示した. カメラに関しては広角かつ撮影速度が可能である GoPro Hero4 black Edition を用い, 撮影モードを Table 1 に設定し, 実験を行った. Figure 4 に示したチェスボードを取り付けたリアレールをカメラと平行

に置き, 既知の距離 L [mm] だけ移動させる. 計測点をチェスボードの格子点とし Figure 4 の様にチェスボードの左上の計測点を計測点番号 1 とし, 縦方向に計測点番号を与えていく. 移動前の計測点と移動後の計測点間の距離を求め真値と比較する事で計測の誤差, 精密度を評価する.

Table 1 GoPro Hero4 black Edition Various elements

| Resolution[p] | Shooting speed[fps] | Field of view |
|---------------|---------------------|---------------|
| 1440 | 80 | Ultra Wide |

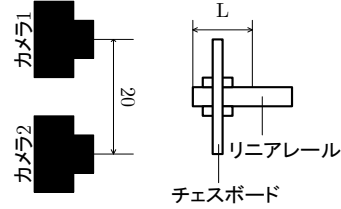


Figure 3 Experimental layout drawing

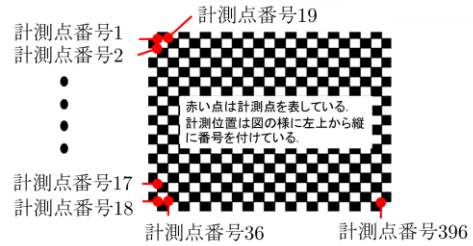


Figure 4 Chessboard and measurement point number

3-2 実験結果

本実験では既知の距離 L [mm] を 13[mm] と 26[mm] に設定し計測を行う. Figure 5 に $L=13$ [mm] の計測結果を示す. また, 各移動距離間の真値と計測結果の誤差と誤差の標準偏差を Table 2 に示す.

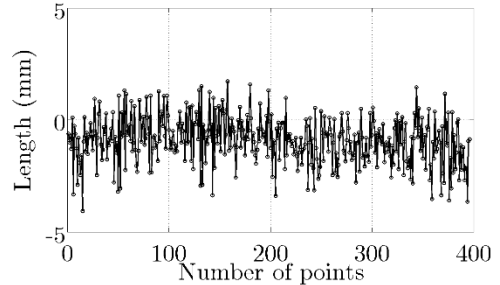


Figure 5 Depth of Measurement surface at $L=13$ [mm]

Table 2 average error and standard deviation

| Migration length | Average error | Standard deviation |
|------------------|---------------|--------------------|
| L [mm] | [mm] | [mm] |
| 13 | 0.913 | 1.050 |
| 26 | 0.012 | 0.909 |

Table 2 より 0~13[mm] の区間において計測点の誤差の平均値は 0.913[mm] あった. また 0~26[mm] の区間において計測点の誤差の平均誤差は 0.012[mm] であった. これは, カメラの歪によるものと考えられ, 近くにある物体の方が遠くにある物体に比べ歪の影響を受ける為, 誤差の平均値はカメラに近い $L=13$ [mm] の方が大きくなったと考えられる. このことから奥に進むと誤差の平均値は小さくなっている. 0~13[mm] の区間において計測値の標準偏差についてみると 1.050[mm] ある. 0~26[mm] の区間において計測点の計測値の標準偏差についてみると 0.909[mm] だけある. この事から手前の方に

ある計測点は標準偏差が大きくなる為奥にある計測面の計測よりも誤差のばらつきが大きい事が分かる。ここで計測誤差が系統的によるものかランダムによるものを判断する。誤差分布から誤差の分布が正規分布のように分布するかしないかで計測誤差が系統誤差かランダム誤差か判断した。結果、本実験には系統的な誤差とランダム的な誤差が含まれている事が分かった。ここでステレオ視法の評価に用いた計測結果に対して、系統的な誤差をなくす為に基準面を用いた奥行方向に対する補正を提案する。今回の計測精度評価では奥行方向への移動前の計測点と移動後の計測点間の距離を計測し真値と比較する事で、計測の精度を求める手法をとっている。故にL=0の位置でも既に計測誤差が含まれている事が考えられる。そこでL=0の計測面の計測値と計測面の計測値から求められる最小2乗平面との残差をL=13, 26[mm]での計測値から減算する事で系統的な誤差に補正を行う。Figure 6にL=0の計測面の計測値と計測値の最小2乗平面の残差を表したチェスボードの表面形状に示す。Figure 6のx numberはチェスボードの横の行を上から表した数値であり、y numberはチェスボードの縦の列を左から表した数値である。カラーバーは残差の距離[mm]を示している。

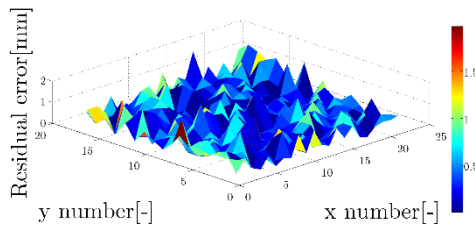


Figure 6 Residual error map

Figure 6 からチェスボードの端の方にかけて残差が生じている事が分かる。この残差を系統誤差として各面の計測位置の値から減算する事でランダム誤差のみが影響する。実際には計測誤差分布は正規分布のようになっていたので最小2乗平面を用いる奥行方向に対する系統誤差に対する補正は有効だったと考えられる。Figure 7にL=13における補正による誤差分布の結果を示す。またTable 3に補正による平均誤差と標準偏差を示す。

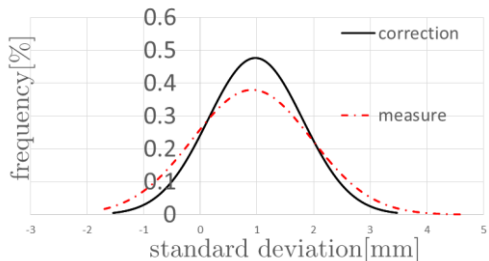


Figure 7 normal distribution

Table 3 average error and standard deviation

| Migration length | Average error | Standard deviation |
|------------------|---------------|--------------------|
| L[mm] | [mm] | [mm] |
| 13 | 0.972 | 0.8370 |
| 26 | -0.013 | 0.8552 |

3-2 考察

本実験の様な短い距離間ステレオ視法における奥行方向の精度は標準偏差を用いれば共に 4.2[mm]以内でのほとんど

どの数値が納まり、誤差は平均をとれば1[mm]以内に納まる事が分かった。また、最小2乗平面を用いる奥行方向に対する補正を行ったが、補正結果は誤差分布が正規分布の様を示している事が分かった。この事より奥行方向に対する補正は有効だった。また補正前に比べ補正後は、誤差のばらつきに関して向上した。誤差は補正後の方が大きくなっているがFigure 8を見ると、真値よりも誤差の値が小さい領域を比べると面積差が補正前の方が大きい為補正後の誤差は正の方向に動いた事がわかる。負の方向の面積が大きかったのは系統誤差が負の方向へ計測データに働いていた為であると考えられる。故に系統誤差が計測データを真値に近い値に働かせていたと考えられる。この事から、ステレオ視法の評価に用いた計測結果に対して系統的な誤差をなくす事が出来たと言える。

また、今回の補正法はステレオ視法の評価において精度を補正する事が出来た。この手法を計測点に対して補正が出来る様にする為の応用法を考えた。最小2乗平面のとの残差の平均値を各基準値から引いた。すると、誤差分布より基準面からの残差を引いた時の分布の仕方よりも誤差のバラつきは大きくなったが誤差分布は正規分布の様を示している事が分かった。今後は、計測点の計測精度の補正の為、今回行った補正法を利用する事で計測精度を向上させることが課題であると考えられる。

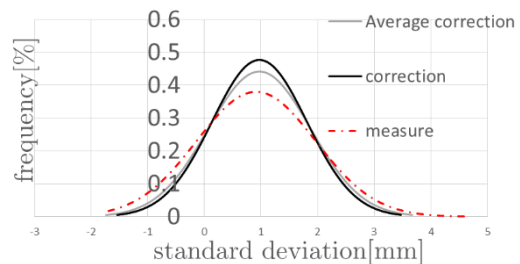


Figure 8 normal distribution

4. 実験② 欠損データの再構築

4-1 実験概要・実験装置、条件

真空槽を用いて真空に近い状態を作り、縦 300[mm]、横 240[mm]、厚さ 11.5[μm] の膜をモーター用いて時計回りから反時計回りに変えた時の膜の計測点の動きをステレオ法により三次元位置を抽出する。膜には、縦横 40[mm]の間隔に縦 8 個、横 7 個計 56 個の計測点を付ける。Figure 9に示したように計測点に番号を付ける。このモデルを用いて、ある計測点が宇宙空間で太陽光によって読み取れなかったと仮定する。欠損させるデータの条件は、7 フレーム(0.116[sec])毎に計測点 1.2.9.10 が読み取れないとし、計測点 1 を再構築する。また、実験器具の配置を Figure 9 に示す。

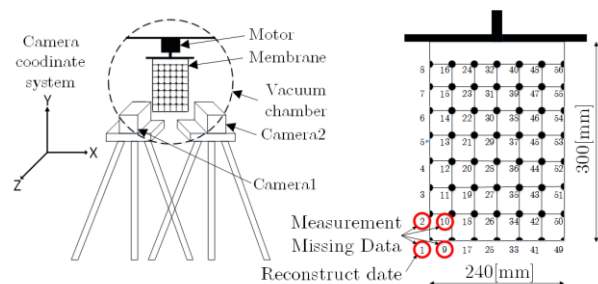


Figure 9 Experimental layout drawing& Membrane

実験に用いられる真空槽、2台のカメラの諸元を Table 4, Table 5 に示す。また、実験条件を Table 6 に示す。

Table 4 Vacuum chamber

| | |
|---------------------|-------------------------|
| Material | SUS304 |
| Ultimate vacuum[Pa] | 10^{-3} |
| Size[mm] | diameter1800×height1000 |

Table 5 Camera HDK-CX535

| | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Part number | HDK-CX535 |
| Maximum shooting speed[fps] | 60 |
| Angle of view[degree] | Horizontal 75 Vertical 48.2 |
| Optical zoom[times] | 30 |

Table 6 Experiment condition

| | |
|-------------------------------|------|
| Vacuum chamber's pressure[Pa] | 0.13 |
| Rotational speed[rpm] | 24 |

4.2 実験結果

2-2 で述べた理論よりステレオ視による三次元位置復元の欠損データの再構築を行う。今回用いたモデルの第一固有値の寄与率は 100% に近く、欠損データを再構築するには第一固有値のみで十分表現できる。しかし、数値解析の結果では、微小な運動モードによる固有値の寄与率が低いため、少ない数でのモードでは、今回のモデルの運動を適切に表現できない。そのため繰り返し計算を一回行う毎に第二固有値、第三固有値と 1 つずつ加えていくことで、微小な変化も再構築できるようにした。今回 20 回の繰り返し計算を行ったので、モード数は、21 個である。再構築した各軸のグラフを Figure 10, Figure 11 に示す。Figure 10, Figure 11 は、カメラ座標系で示した欠損させた計測点 1 の真値と推定手法を用いた推定値の比較であり、 x 軸：被写体に対して横方向、 y 軸：被写体に対して縦方向、 z 軸：被写体に対して奥行き方向である。

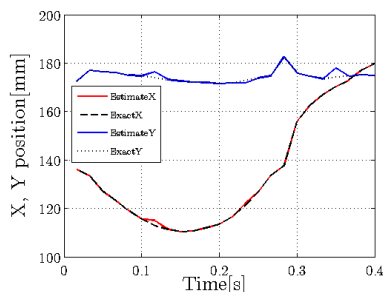


Figure 10 Exact date & Estimate date(X, Y coordinates)

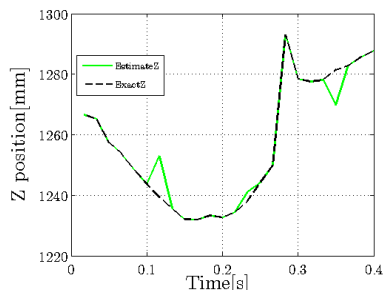


Figure 11 Exact date & Estimate date(Z coordinates)

4.3 考察

各軸の再構築したデータと元データの誤差値を Table 7 に示す。この時、平均誤差変位は、再構築データが 1 ステップで元データとどだけずれているかを示す。

Table 7 Error value

| | X 軸 | Y 軸 | Z 軸 |
|-----------------|------|------|------|
| inaccuracy [mm] | 2.16 | 3.70 | 13.7 |
| mean error [mm] | 0.76 | 1.74 | 7.12 |

X, Y, Z 軸の欠損データの再構築を行い、 X, Y 軸は、平均誤差変位が 2[mm]以下に出来たが、今回用いたモデル（計測点 1)の元データから 1 ステップでどだけ動いたかを示す平均変位は、 X 軸：4.14[mm]、 Y 軸：1.38[mm]であった。平均変位と誤差変位を比べると、誤差が大きいが分かる。また、 Z 軸の平均変位は、5.33[mm]であり平均誤差変位の方が大きいことから X, Y 軸よりも精度が悪いことが分かる。再構築データの精度を上げるために、繰り返し計算の回数を増やす事やモード係数の数についても検討する必要がある。

5. 結言

- ステレオ法の誤差、精度の評価を行い計測データから誤差の補正をここない誤差の分布を補正した。この補正法は本実験の様な短い距離間においては有効である。
- 真空槽を用いて真空に近い状態の膜の運動モデルを作った。このモデルの計測データから故意に欠損させたデータを作り、計測欠損データの再構築を行った。再構築することが出来き、有効性を示せたが、再構築データと元のデータの誤差が大きいが問題であることが分かった。

6. 今後の展望

今回の計測結果は狭い計測範囲に関して誤差と精度の評価、補正を行った。今後は広範囲に計測を行い、今回の評価、補正法が実行方に妥当であったか検討する。また計測点の計測精度の補正の為、今回行った補正法を利用する事で計測精度を向上させる。また、今回用いた理論を用いて、あらゆる柔軟構造物の計測欠損データの再構築に有効性があるか検討していく。

参考文献

- 宇宙航空研究開発機構：「小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS 飛翔実験計画書
- Z.Zhang : Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations. At <http://research.microsoft.com/zhang>
- 平邦彦：固有直交分解による流体解析,2011,P116-P1181 At <http://www.naqare.or.jp/download/noauth.html?d=30-2rensa2.pdf&dir=38>
- R.Everson and L.Sirovich : Karhunen-Loeve Procedure for gappy data ,1995,
- 三田恭平：固有直交分解を用いた計測データと数値解析の統合による遠心展開膜面の形状推定,日本大学修士論文,2014
- 丸木悠暉：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,日本大学卒業論文,2014
- 田中宏明：ステレオ視法と高精度変位計を統合した高精度鏡面誤差評価方法に関する研究,SEC11,C6(2010).