

位相シフト法を用いた形状計測方法の研究

Research on shape measurement method using phase shift method

奥山・宮崎研究室

Okuyama-Miyazaki Laboratory

加藤菜摘

Natsumi Kato

In recent years, it has been proposed to adopt a membrane structure for a large and highly accurate spatial structure, and in order to realize this, the reliability of in-orbit deployment is important. Therefore, in order to ensure the reliability of unfolding, it is necessary to confirm that the unfolded shape has a small shape error, and for that purpose, high-precision shape measurement is required. As a highly accurate shape measurement method, shape measurement of the film surface by the grating projection method is being studied. In this study, in order to realize the grating projection method in orbit, we first performed grid projection using the phase shift method as the phase analysis method on the ground, and measured the shape. As a result of the experiment, it was found that the experimental method needs to be improved in order to realize the grating projection method in orbit.

1. 序論

1.1 背景

膜構造物は軽量かつ展開性に優れているため、大型宇宙構造物の主要な構造様式として使用されている。近年、スターシェードシステムやSSPS (Fig.1.) 等の大型で高精度な宇宙構造物が提案されており、これらの実現には軌道上で求められる形状に高精度で確実に展開する展開信頼性が重要である。そのため、展開信頼性を保証するためには高精度な形状計測を行い、地上実験や軌道上で、求められた形状に小さい形状誤差で展開することを確認することが必要となる。そのため、高精度な形状計測手法の一つとして、格子投影法を用いて膜面構造物の形状計測を行うことが検討されている^[1]。

格子投影法とは、プロジェクタとカメラを用いた画像計測手法であり、計測対象物に正弦波または余弦波の格子を投影し、カメラで撮影された画像の輝度値から位相解析を行い各画素での三次元座標を算出する計測手法^[2]である。位相解析手法には位相シフト法と呼ばれる、位相の異なる正弦波縞パターンを画像をプロジェクタで計測対象物に投影し、その様子をカメラで撮影して、撮影画像を解析することで位相を求める手法が用いられる。

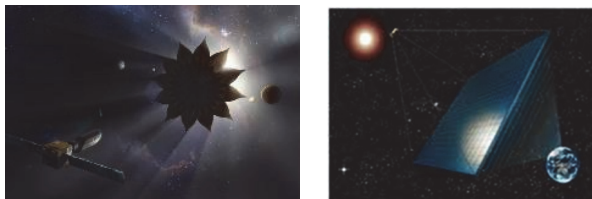


Fig.1. スターシェードシステム, SSPS

1.2 目的

本研究の目的は、軌道上での膜構造物への格子投影法を用いた形状計測実現のために、まず地上で格子投影法の実験を

行い、実験結果から、実際に軌道上で格子投影法を行うために解決すべき問題点について考察することである。

2. 理論

2.1 格子投影法

Fig.2に格子投影法の計測系の概要を示す。図に示したように、本実験で行った格子投影法では、計測対象を挟み込むようにして、奥行き方向に2枚の平面の基準面を設ける。基準面はキャリブレーションを行うために必要となる。この2つの基準面で予め格子を投影して、その様子をカメラで撮影しておき、基準面を取り除いた状態で計測対象に格子を投影する。計測対象の表面形状に応じて格子画像がゆがむため、そのゆがみ量を位相解析することで計測対象の位置座標を求めることが出来る。ここでの位相とは、投影された正弦波縞パターンを投影した画像の輝度値から算出する値であり、位相値の算出方法には位相シフト法を用いている。

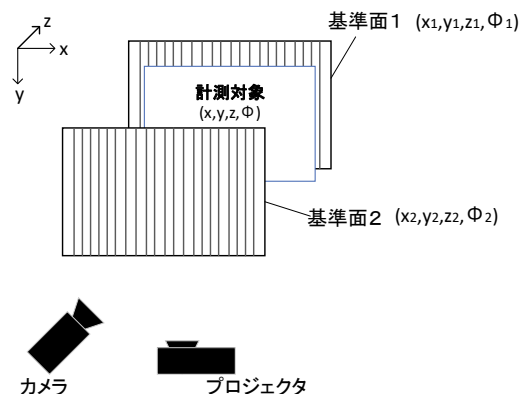


Fig.2. 格子投影法の計測系

格子投影法の利点としては以下の点が挙げられる。

- ・計測系の構成が簡易
- ・計測対象にセンサー等を取り付ける必要が無いため、被計測

物に影響を及ぼさない。

・使用するカメラの解像度を上げることで、計測精度を向上させることが出来る。

本実験での座標系は横方向を x 軸、縦方向を y 軸、垂直方向を z 軸としている。また、基準面1, 2における位置座標を $(x_{1,2}, y_{1,2}, z_{1,2})$ 、基準面1, 2における位相値を $\phi_{1,2}$ とする。計測対象物の位相値を ϕ とすると、計測対象物の位置座標 (x, y, z) は次式で求めることが出来る。

$$\begin{aligned} x &= \frac{\phi - \phi_1}{\phi_2 - \phi_1} (x_2 - x_1) + x_1 \\ y &= \frac{\phi - \phi_1}{\phi_2 - \phi_1} (y_2 - y_1) + y_1 \\ z &= \frac{\phi - \phi_1}{\phi_2 - \phi_1} (z_2 - z_1) + z_1 \end{aligned} \quad (1)$$

(1)式は、投影される正弦波縞パターンの位相に対し、計測対象の位置座標が、2枚の基準面の間で線形に変化すると仮定して導出されている^[3]。

2.2 位相シフト法

本実験では、投影された位相の解析方法として位相シフト法を用いている。位相シフト法では格子を投影したグレースケール画像の全画素における輝度値 I から任意の画素の位相値 ϕ を求めることが出来る。位相の算出は、位相を $\pi/2$ ずつずらした4枚のグレースケール画像から行う。この時、それぞれの画像における任意の点の輝度値 I_n は以下の式で表される。

$$I_n = a \cos\left(\phi + \frac{n\pi}{2}\right) + b \quad (2)$$

ここで、 a は輝度振幅、 b は背景輝度値、 $n\pi/2$ は位相のシフト量($n = 0, 1, 2, 3$)を表す。

任意のピクセルでの位相値は次の式で求められる。^[4]

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2} \quad (3)$$

(3)式を用いて基準面1, 2および計測対象での位相値をそれぞれ求め、求めた位相値を代入することで (1)式から計測対象の位置座標を求めることが出来る。

本実験では、プロジェクタから投影した格子画像の輝度値をカメラで撮影した画像を読み込んで算出し、求めた輝度値から位相値を求め、最終的に3次元位置座標を求めた。

3. 実験方法

3.1 実験装置

本実験ではカメラ、プロジェクタを以下の図 (Fig.3.) のように設置しホワイトボードに格子画像を投影して計測を行った。カメラとプロジェクタの仕様はTable 1に示す。

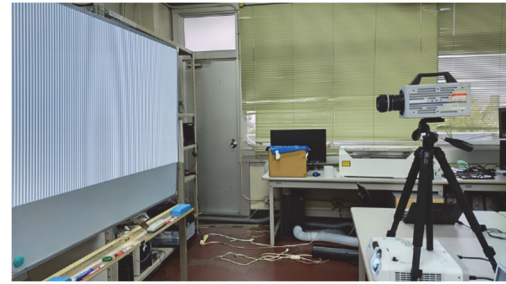


Fig.3.実験の様子

Table 1 カメラ、プロジェクタの仕様

Camera : Photron FASTCAM SA3	
Resolution	1024×1024pixel
Full Frame	2000fps
Density Gradation	12bit(Monochrome)
Projector : Epson EB535W	
Resolution	1280×800pixel

3.2 実験方法

Fig4 に実験系の構成を示す。PC とプロジェクタを繋ぎ、正弦波位相パターンを投影し、その様子をカメラで撮影する。カメラはPC と接続されており、撮影した画像はモノクロ画像として保存される。

本実験では、ホワイトボードを基準面および計測対象として位置を変え、それぞれの位置で位相を $\pi/2$ ずつずらした異なる4種類の格子画像を投影して、その様子をそれぞれ撮影した。カメラ、プロジェクタから950mmの位置を基準面1とし、基準面1から手前に100mmホワイトボードを移動させた850mmの位置を基準面2とする。計測対象面は基準面1, 2の間である900mmの位置とした。撮影した画像は基準面1, 2および計測対象面それぞれの位置ごとに4種類の画像で、計12枚となる。基準面1および基準面2で撮影した計8枚の画像はキャリブレーションに用いている。

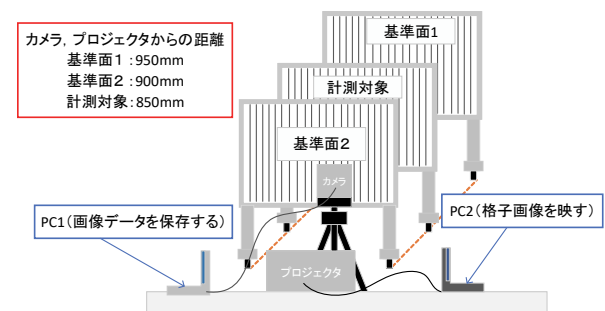


Fig.4.実験系の構成

4. 実験結果

以下に実験結果を示す。画像の読み込みおよび数値計算はMATLABを用いて行った。

数値計算の結果を Fig.5.~Fig.7.に示す。数値計算については、まず基準面1, 2 および計測対象面の各位置で撮影した画像を読み込み、12枚の画像全てにおいて、各画素での輝度値をそれ

それぞれ求めた。その後(3)式を用いて基準面 1, 2 および計測対象面それぞれでの全画素における位相値を求める。求めた基準 1, 2 および計測対象面における同画素の位相値を(1)式に代入することにより、全画素での z 方向位置座標を得た。

また、グラフ中の x, y 方向の変位についてはホワイトボード上に 3 点を取り、その点の画像上での画素数を MATLAB を用いて読み取り、位置座標とピクセル座標との関係から求めている。ホワイトボード上に取った 3 点をそれぞれ A_1, A_2, A_3 とするとそれぞれの点での位置座標 (X, Y) [mm]は $(X_1, Y_1) = (414, 264), (X_2, Y_2) = (649, 256), (X_3, Y_3) = (417, 515)$ である。また、MATLAB を用いて求めた各点でのピクセル座標 (a, b) は $(a_1, b_1) = (49, 48), (a_2, b_2) = (937, 9), (a_3, b_3) = (69, 992)$ である。ここでの a は画像の横方向 (x 方向) のピクセル数を表し、 b は画像の縦方向 (y 方向) のピクセル数を表す。

誤差を考慮したピクセル座標から位置座標への変換式は以下ようになる。

$$X = pa + q, Y = sb + r \quad (4)$$

ただし、

$$\begin{aligned} p &= \frac{X_2 + \delta X_2 - X_1}{a_2 - a_1} \\ &= \frac{X_2 - X_1}{a_2 - a_1} - \frac{a_3 - a_1}{(a_2 - a_1)^2 + (a_3 - a_1)^2} e_x \\ q &= X_1 - \frac{a_1(X_2 + \delta X_2 - X_1)}{a_2 - a_1} \\ &= \frac{a_2 X_1 - a_1 X_2}{a_2 - a_1} + \frac{a_1(a_3 - a_1)}{(a_2 - a_1)^2 + (a_3 - a_1)^2} e_x \\ r &= \frac{Y_2 + \delta Y_2 - Y_1}{b_2 - b_1} \\ &= \frac{Y_2 - Y_1}{b_2 - b_1} - \frac{b_3 - b_1}{(b_2 - b_1)^2 + (b_3 - b_1)^2} e_y \\ s &= Y_1 - \frac{b_1(Y_2 + \delta Y_2 - Y_1)}{b_2 - b_1} \\ &= \frac{b_2 Y_1 - b_1 Y_2}{b_2 - b_1} + \frac{b_1(b_3 - b_1)}{(b_2 - b_1)^2 + (b_3 - b_1)^2} e_y \end{aligned} \quad (5)$$

A_1, A_2, A_3 での位置座標とピクセル座標をそれぞれ(5)式に代入すると、 $p = 0.2672, q = 398.556, r = 0.2640, s = 253.628$ となり、この値を(4)式に代入して x, y の位置座標を得た。

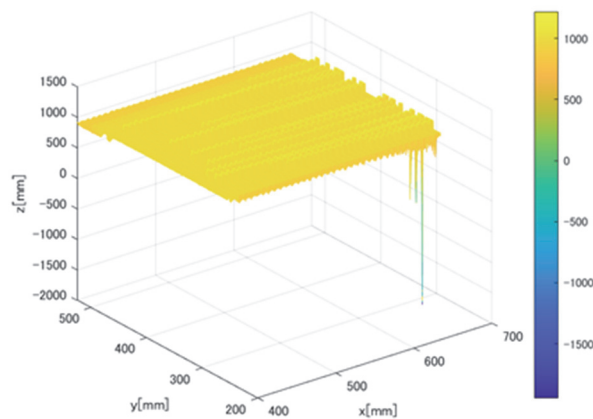


Fig.5. 計算結果

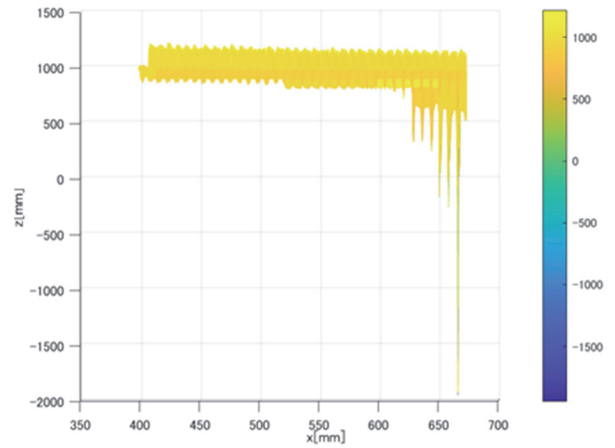


Fig.6. 計算結果 (x - z 面)

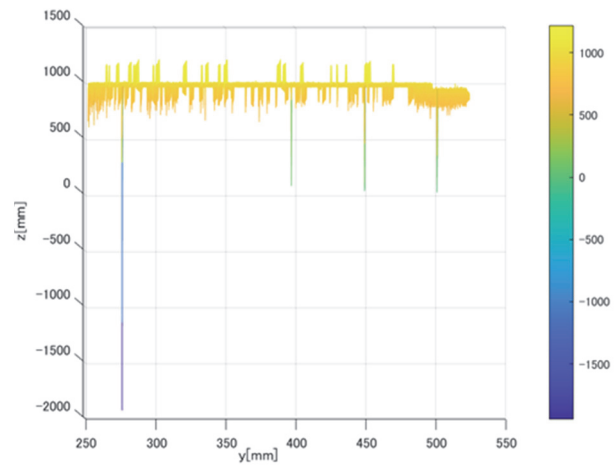


Fig.7. 計算結果 (y - z 面)

5. 考察

今回の実験では、カメラから900mmの位置に設置したホワイトボードの平面を計測したが、Fig.5~Fig.7.からわかるように、計算結果が主に500mm付近から1200mm付近の値で波打つような面となってしまった。また、計算の結果が900mmから大きく離れた位置となっている部分も見られた。この原因としては、実験自体が治具等を用いてカメラ、プロジェクタと基準面および計測対象との距離を精密に測らなかったことが考えられる。また、キャリブレーションを行うための基準面1, 2 での z の位置座標について、1mm単位で計測した値を(1)式に代入していることも平面を計測できなかった要因の一つであると考えられる。

また、 x, y 方向の位置座標の計測についても同様に計測誤差がある。この原因は、 x 方向では約250mm、 y 方向では約270mm程度の狭い範囲の計測であるにもかかわらず、ホワイトボード上に取った3点の位置座標の計測を、1mm単位で計測した値を用いて位置座標とピクセル座標の変換を行っている点も、 x, y 方向の位置座標の誤差に影響していると考えられる。

今回の実験結果から、格子投影法を行う際にはリニアスライダ等を用いて、基準面とカメラ、プロジェクタとの距離を精密に調整できるように治具を組んで、キャリブレーションの段階で誤差が生じないように工夫をして実験を行う必要があると考えられる。

今後、実際に軌道上で格子投影法を行うためには、地上で計測誤差を少なく形状計測できるように改善していく必要がある。そのためには、まずキャリブレーション時に必要な位置座標の計測を精密に行うように改良する必要があることがわかった。

また、実験結果から、実際に軌道上で膜面構造物に対して格子投影法を行うには、キャリブレーションを正しく行うため、基準面を正確に取る機構が必要であると考えた。さらに、位相シフト法を用いた格子投影法においては、格子を投影した状態での撮影画像の輝度値から位相値を求めるため、撮影画像にきれいに格子の画像が映る必要があるため、撮影時に膜面にきれいに格子画像が映る様、明るさの調整が行えるようにする必要があると考える。また、膜面は光が反射して格子が投影されない状態になることを防ぐために、艶消しの処理を行うと良いと考える。

6. 結論

今回の実験方法では、位相シフト法を用いて計測誤差の少ない形状計測を行うことが出来なかったため、計測方法を改善する必要がある。改善策としては、以下の方法が考えられる。

- ・カメラ、プロジェクタからの基準面の距離を精密に取ることが出来るよう治具を組む。
- ・キャリブレーションに用いる位置座標の計測を精密に行う。

今後は、実際に軌道上で膜面構造物に対して格子投影法で形状計測ができるよう、キャリブレーション方法や、格子を投影した状態をきれいに撮影する方法などを検討してゆく。

参考文献

- [1] 樋口健, 岸本直子, 岩佐貴史, 勝又暢久: 格子投影法による曲面変位計測~格子を投影しない格子投影法~. 第31回宇宙構造・材料シンポジウム, 2015, SA600047011, A10
- [2] 岸本直子, 亀井宏貴, 原田卓, 岩佐貴史, 樋口健: 格子投影法を用いたハニカムサンドイッチパネルの表面形状計測. 航空宇宙技術Vol.13, 2014, pp61-70.
- [3] 岩佐貴史, 采光啓太, 杉山遼, 岸本直子, 樋口健: 格子投影法によるポリイミドフィルムの表面形状計測. 航空宇宙技術Vol.11, 2012, pp69-78.
- [4] 野坂健一郎, 荒木秀和, 中原智治: 位相シフト法インライン3次元外観検査システム. パナソニック電工技法 57(3), 2009, pp29-34