

## ～格子を投影しない格子投影法～

樋口 健 (室蘭工大), 岸本 直子 (摂南大), 岩佐 貴史 (鳥取大), 勝又 暢久 (室蘭工大)

Ken Higuchi (Muroran IT), Naoko Kishimoto (Setsunan Univ.),  
Takashi Iwasa (Tottori Univ.), Nobuhisa Katsumata (Muroran IT)

### 1. はじめに

宇宙展開構造物の高精度化とそのため軌道上表面形状計測の要求が強まる傾向にあり、大型構造物、軌道上計測、高精度計測などを合わせて実現する必要が生じている。

非接触表面形状計測法である格子投影法の計測原理は、正弦波状明暗格子をプロジェクターから基準面と計測対象物表面に投影し、カメラで画像を撮影するものであり、その計測原理は、基準面に投影した正弦波状明暗格子を座標の基準にして、計測対象物表面のカメラ各画素の輝度値をもとに位相解析し、計測対象物の各点座標を特定するものである<sup>[1]</sup>。格子投影法の特徴は、

- ・機器構成が簡便、
- ・選ばれた点の計測ではなく面計測 (超多点計測)、
- ・短時間で撮影、

などであり、地上で宇宙展開構造物の表面形状計測に用いることができるだけでなく、衛星に搭載して軌道上での表面形状計測に適用できる可能性がある。

### 2. さまざまな格子投影法

#### 2.1 格子投影法の基本原理と内挿法

まず、これまでに開発されたさまざまな格子投影法を概観する。

格子投影法の計測手順は、基本的には、計測対象物表面位置を挟んで計測光学系奥行き方向の前後位置に基準面を置いて格子投影画像2種類を予め撮影しておき、次に基準面を撤去し計測対象物表面に格子を投影して、表面形状に即してゆがん

だ格子模様を撮影し、ゆがみ量を位相解析することにより計測対象物表面の座標値を決定する。計測点数を非常に多くできるので、面計測 (超多点計測) となる。奥行き方向の2枚の基準面で構成される仮想的な空間座標内を直線近似 (内挿) して計測対象物表面の空間座標値が決定されるので、この基本原理を「内挿法」と呼ぶ (図1)<sup>[1]</sup>。

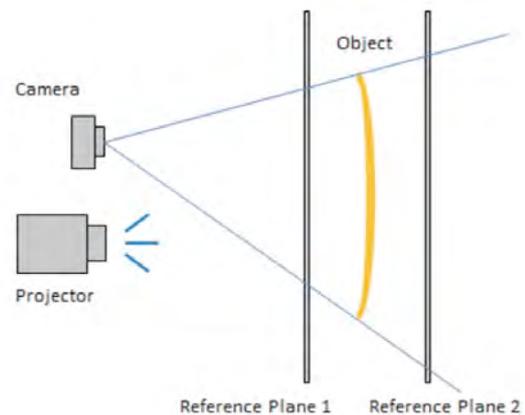


図1 格子投影法の基本原理図

#### 2.2 外挿法

内挿法を実施するためには、原理的には計測対象物より大きい基準面を用意しなければならず、計測対象物が大型化してくると、このことは格子投影法適用の制約となってくる。そこで、計測対象物を、2枚の基準面の間ではなく、2枚の基準面の光学系のさらに奥行き方向に置くと、計測対象物が基準面より大きくても良いことになる (図2)。2枚の基準面で構成される仮想的な空間座標を奥行き方向に直線近似 (外挿) して計測対象物表面の空間座標値が遠方に決定されるので、これを「外挿法」と呼ぶことにする<sup>[2]</sup>。

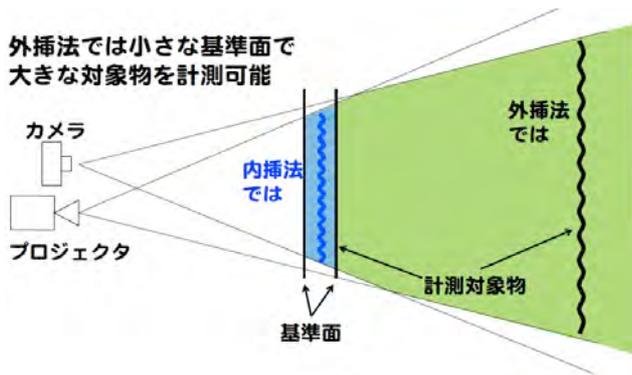


図2 内挿法と外挿法

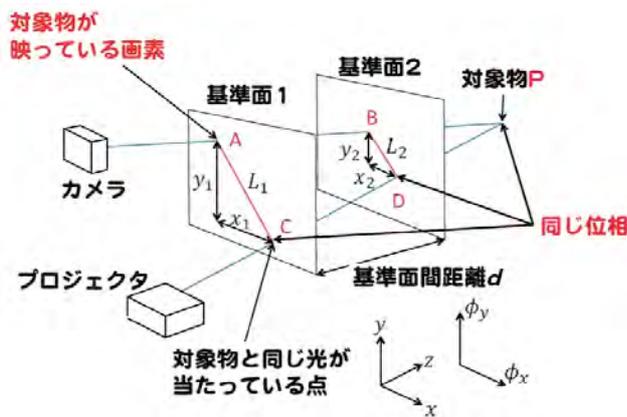


図3 近似を用いない幾何学的座標値算出方法

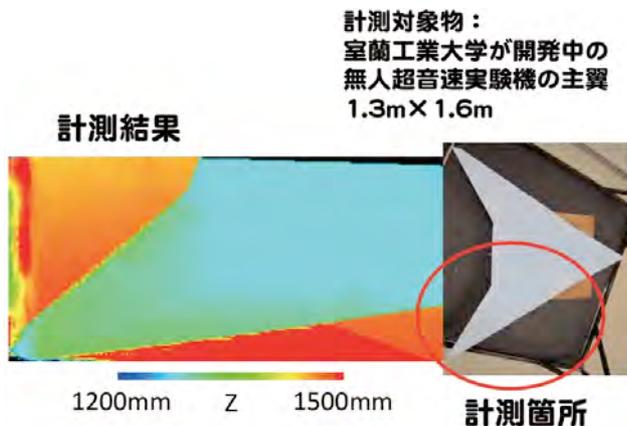
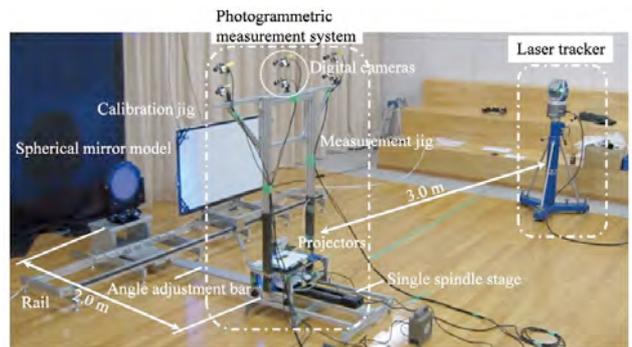


図4 外挿法による大型構造物表面形状計測例

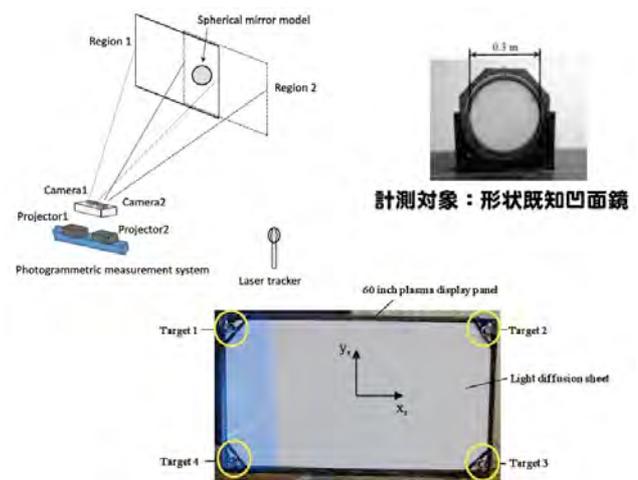
外挿法では、外挿により計測精度が劣化することが容易に予想される。そこで、2種類の精度向上策を実施した。ひとつは、図3に示すように、近似を用いない幾何学的座標値算出方法であり、もうひとつは、計測値と真値との関係を予め求めておき補正する方法である<sup>[3]</sup>。図4に、これら2種類の精度向上策を実施した計測例を示す<sup>[4]</sup>。

### 2.3 計測対象物の大型化と計測精度の高精度化

計測対象物がさらに大型化しかつ計測精度要求がさらに高精度化すると、構造物の全体形状を1つの画面で計測しようすると形状が高精度には再現されなくなる。そこで、大きな計測対象を小さな計測領域に分割してその領域内では高精度に計測し、領域を超えて計測データをつなぐことにより全体形状計測を高精度で再現する方法が考案された<sup>[5]</sup>。図5(a)は、レーザートラッカーと格子投影法を利用した形状データの結合による計測システム全体構成である。図5(b)に形状結合の原理を示す。基準面の4隅にレーザートラッカーのターゲットを取り付け、ターゲットの絶対位置をレーザートラッカーで決定することにより基準面同士の関係が得られるので、計測データをつなぐことができる。



(a) 計測システム全景



(b) 分割領域のつなぎ方

図5 レーザートラッカーと格子投影法を利用した形状データの結合による形状計測<sup>[5]</sup>

## 2.4 可搬型計測装置

計測の高精度化を追求すると、図 5(a)に示す計測系のように、計測治具の高精度化、計測系の熱ひずみ防止のための温度管理や床振動防止などの計測環境の整備が極めて重要であることがわかってきた。しかし、計測環境が管理された場所に高精度の大型試験治具を用意し、そこに測定対象物を持ち込んで計測できる場合はむしろ少ないと思われる。そこで、計測機器構成が簡便であるという格子投影法の特徴に立ち帰って、計測対象物の設置してある場所に計測装置を持ち込んで計測できるように、図 6 に示す可搬型計測装置が試作された<sup>[6]</sup>。



図 6 可搬型計測装置  
(モバイル化によるオンデマンド計測)<sup>[6]</sup>

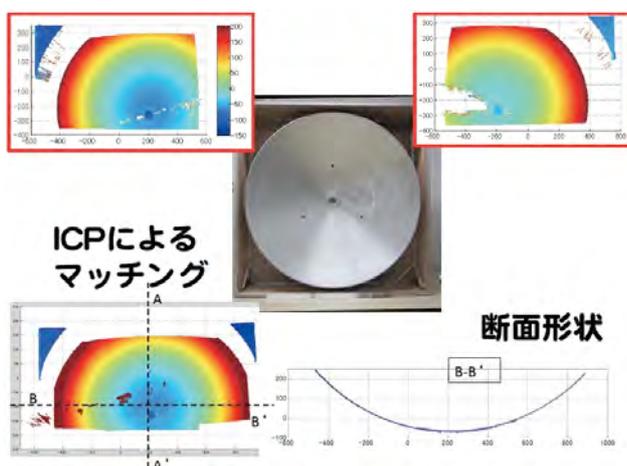


図 7 ICP による計測結果のマッチング<sup>[7]</sup>

可搬型計測においても、一度に計測できる領域より大きい計測対象物に対しては、区分された計測領域を超えて計測データをつないで全体形状を再現する方式が可能であり、図 7 の例では、レーザートラッカーのような外部機器を用いる代わりに、区分された計測領域の計測データにある特徴点を用いて表面形状をつないでいる<sup>[7]</sup>。

## 2.5 2カメラ法

以上述べてきた格子投影法は、計測対象物表面にプロジェクターから格子模様を投影している。しかし、例えば宇宙空間で表面形状を計測する際には、日照の条件により格子模様を投影できない場合も考慮しておかなければならない。計測対象物表面に予め格子模様が描かれていれば格子模様を投影する必要はなく、日照時であっても格子模様が観測され、またプロジェクターも必要なくなる。このために、カメラを2台用いて、2台のカメラの2本の視線の交点で計測対象物表面の空間座標を決定することにする。この計測原理の概念図を図 8 に示す。2カメラ法により、1カメラと1プロジェクターとを用いる通常の方法と同程度の計測精度が得られることがわかっている<sup>[8]</sup>。

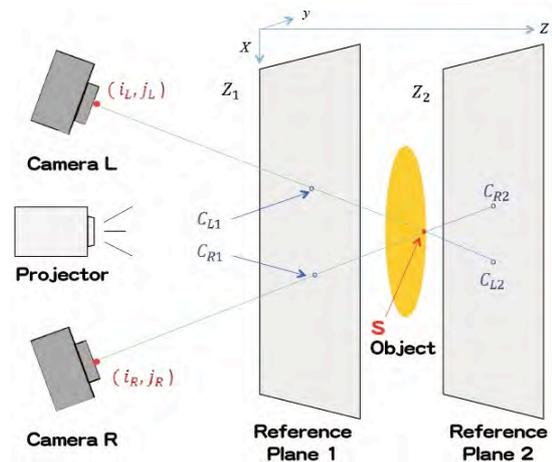


図 8 2カメラ法の計測原理概念図

## 3. 相対変位計測

2カメラ法においても平板を基準面とすることにより計測対象物の3次元表面形状が計測できるが、さらに、格子模様のある計測対象物そのもの

を基準面とすることにより、計測対象物が形状変形や変位した際の相対変位の計測を試みた。しわやたるみのある膜面構造物のように多くの曲面の連続で構成されている計測対象物を想定して、図9のように向きを変えられる平面を用意し、これが大きな曲面の区分平面を表すとみなして、これを剛体変位させた場合の相対変位計測を実施した結果を図10に示す<sup>[9]</sup>。この計測例では、計測対象に格子を貼り付けるのではなくプロジェクターから格子を投影する通常の2カメラ法で計測した。傾いた平面であっても、一様な剛体変位が計測されている。

平板に左右方向の傾き角与えて基準面撮影および計測対象物撮影

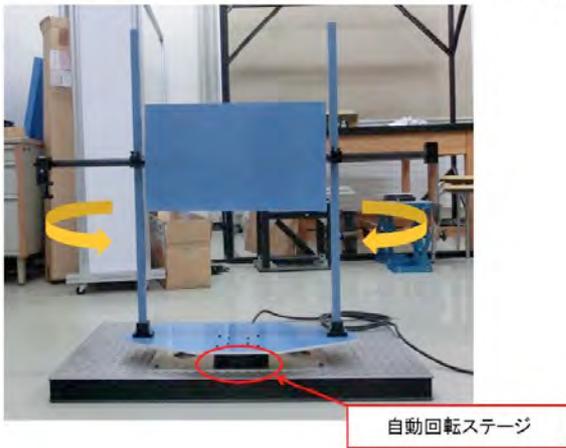


図9 平板に傾き角を与えた計測実験

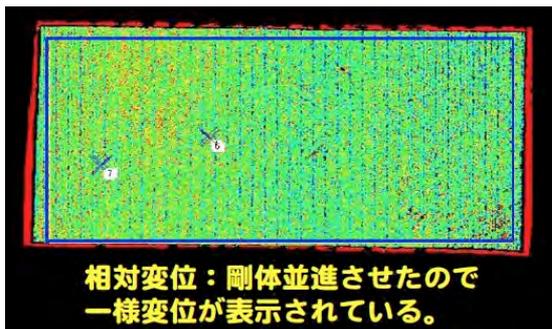


図10 相対変位計測結果

#### 4. 格子を投影しない2カメラ法とひずみ計測

##### 4.1 2次元格子による表面形状計測

2カメラ法では計測対象表面に格子を投影するかまたは貼り付ければ良い。格子を投影する場合は、1次元格子すなわち正弦波状明暗の平行縞模

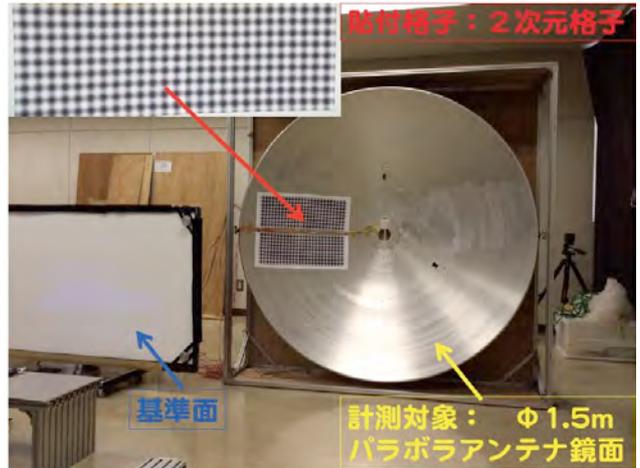


図11 2次元格子貼付によるパラボラ面計測実験

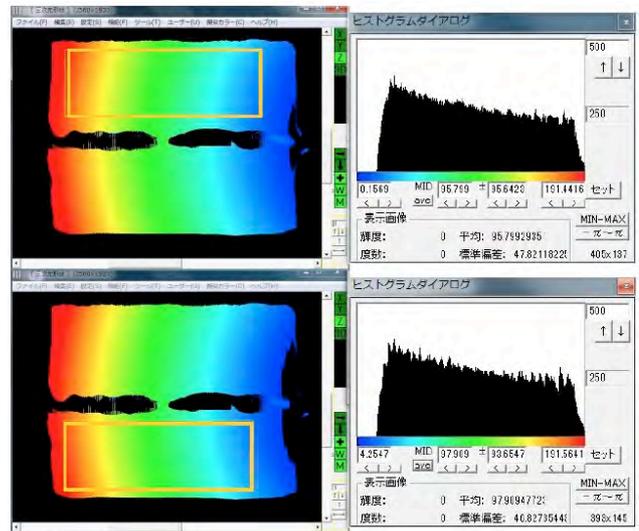


図12 2次元格子貼付による表面形状計測結果

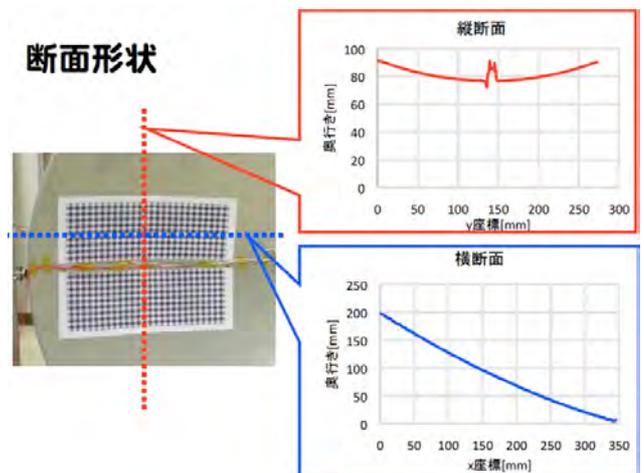


図13 2次元格子貼付による表面形状計測断面

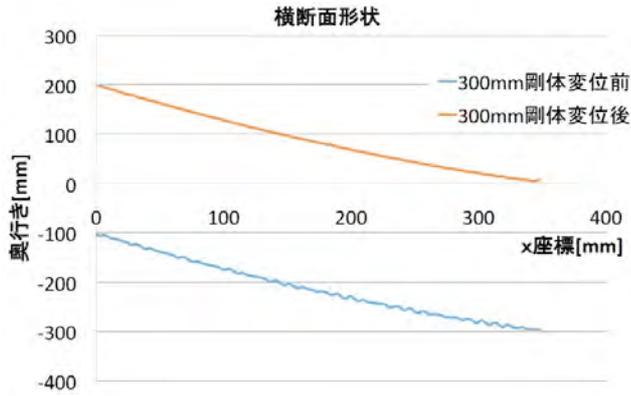


図 14 剛体並進移動前後の形状計測結果

様を、向きを変えて2回に分けて投影するが、計測対象表面に格子模様を貼り付けるかまたは予め描いておく場合は、一度の撮影で両方向の情報が含まれていなければならないため、2次元格子模様を用いる必要がある。大型パラボラアンテナ反射鏡面の一部に2次元格子模様を貼り付けて形状計測を試みた(図11)。この曲面形状計測結果を図12に示す。計測された断面形状を図13に示す。また、反射鏡面全体を平行移動させた計測例を図14に示す。図中300mm剛体移動前の計測は外挿法の範囲である。2次元格子の貼付により2カメラ法で形状計測ができることが示された。

#### 4.2 ひずみ計測

計測対象物の表面に2次元格子が描かれているならば、表面ひずみが非接触で計測できる可能性があり、ひずみ計測を試みた。ひずみ計測結果を図15に示す。同図によれば、ひずみは計測されているものの精度は不明であるので、ひずみ既知の別実験を行った。まずプラズマディスプレイ平面モニターに2次元格子を表示させ、次に既知のひずみを想定した別の2次元格子を表示させて、その間のひずみを計測した。まず形状データが計測される(図16)。全面一定の2次元既知ひずみとして8.2%に設定したのに対し、計測によるひずみ計算結果は8.38%であり(図17)、大きなひずみ現象に対してある程度の精度が期待される。ひずみ計測精度の検討は今後の課題である。

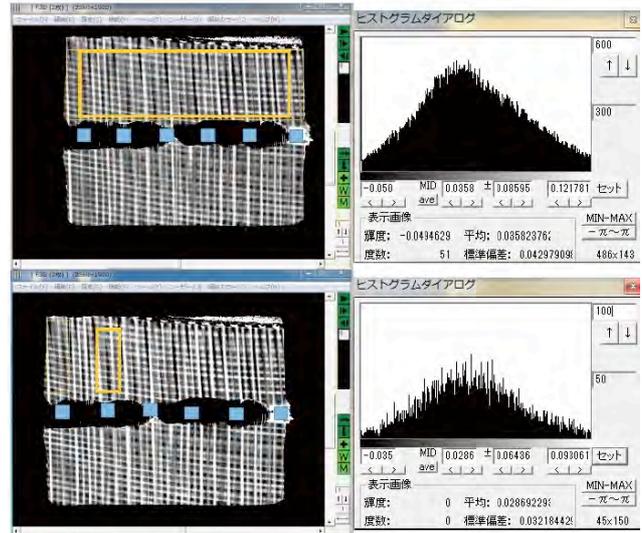


図 15 2次元格子貼付によるひずみ計算結果

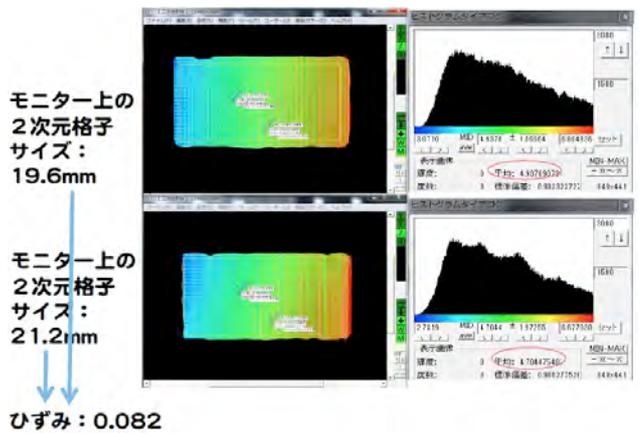


図 16 モニター画面を用いたひずみ計算の準備のための2種類の形状計測

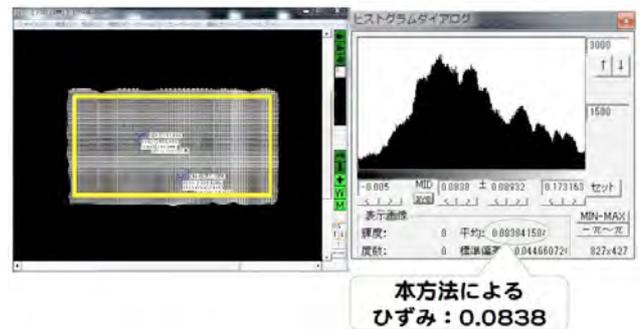


図 17 モニター画面を用いたひずみ計算結果

## 5. まとめ

(1) 計測対象に格子を描いておけば、格子を投影することなく2カメラ法により表面形状計測が

できる。つまり、軌道上または計測現場で格子投影装置が不要となる。

(2) 計測対象に格子を描いておけば、原理的には格子の伸縮すなわち表面ひずみも計測できる。

#### 謝辞

本研究の一部は、ISAS/JAXA 戦略的開発研究費「大型高精度光学架台に関する研究」の助成および科学研究費助成事業基盤研究(C)「計測対象の大きさによらない高精度動的表面形状計測法」(課題番号 15K06594)により行われたものである。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

[1] 渡邊隆司, 岸本直子, 樋口 健, 中篠恭一, 森本吉春, 藤垣元治, 塩川貴之: “伸縮膜におけるリンクルの計測と解析,” 第 52 回宇宙科学技術連合講演会, 3E02, (2008. 11), 淡路.

[2] 三輪武史, 樋口 健, 藤垣元治, 塩川貴之, 岩井達也, 似鳥 透: “格子投影法における 外挿法の適用と面計測,” 第 55 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3A04, JSASS-2011-4441, (2011. 11), 松山.

[3] 似鳥 透, 岩井達也, 樋口 健, 相原弘匡, 村瀬祥宏: “格子投影法外挿法における面形状計測座標の幾何算出法の適用,” 第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演集 1010, JSASS-2012-4286, (2012. 11), 別府.

[4] 岩井達也, 似鳥 透, 樋口 健, 三輪武史: “格子投影法による大型構造物の平面形状計測,” 第 54 回 構造強度に関する講演会, 3A01, JSASS-2012-3065, pp. 185-187, (2012. 8), 熊本.

[5] 岩佐貴史, 岸本直子, 樋口 健, 藤垣元治, 小木曾望: “面計測と点計測を統合した大型宇宙構造物の高精度形状計測法の提案,” 航空宇宙技術, Vol. 14, pp. 95-103, (2015. 4).

[6] 岸本直子, 樋口 健, 藤垣元治, 岩佐貴史: “格子投影法を用いた可搬型計測装置による 3 次元形

状計測,” 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 1G16, JSASS-2014-4145, (2014. 11), 長崎,

[7] 岸本直子: “可搬型高精度 3 次元計測装置によるパラボラアンテナの形状計測,” 第 57 回構造強度に関する講演会, (2015. 8), 岡山.

[8] 相原弘匡, 岩井達也, 似鳥 透, 樋口 健, 岩佐貴史, 岸本直子, 藤垣元治: “格子投影法 2 カメラ計測法による大型構造物の面形状計測と精度評価,” 第 55 回構造強度に関する講演会, 2A06, JSASS-2013-3050, pp. 136-138, (2013. 8), 室蘭.

[9] 伊藤良磨, 樋口 健, 相原弘匡: “格子投影法 2 カメラ法による相対変位計測,” 第 57 回構造強度に関する講演会, 2A11, JSASS-2015-3046, pp. 125-127, (2015. 8), 岡山.