

A11 格子投影法 2カメラ法における繰り返し計測精度

樋口 健, 相原弘匡, 似鳥 透, 松尾剣都 (室蘭工大),

岩佐貴史 (鳥取大), 岸本直子 (摂南大)

Higuchi, K., Aihara, H., Nitadori, T., Matsuo K. (Muroran IT),

Iwasa, T. (Tottori University), Kishimoto, N. (Setsunan University)

1. 緒言

面形状計測を簡便な装置で短時間に取得できる格子投影法に着目し、宇宙構造物などの大型構造物の表面形状計測を高精度に行う手法の開発と検討を行っている。計測対象が大型であることと高精度に計測することは相容れないことであるので、これに対処するために、区分的計測データを連結して大型計測対象の表面形状を再現する手法を想定し^{[1][2]}、このときに必要とされる計測繰り返し誤差について検討を行った。本稿では、格子投影法 2カメラ法において実施した計測装置の改良と繰り返し計測精度実験について報告する。

2. 格子投影法による大型構造物表面形状計測高精度化の試み

2.1 外挿法の検討

格子投影法の従来の内挿法では、計測対象物より大きな基準面が必要となるので、このままでは大型構造物の計測には不都合である。そこで、計測対象物を計測系から見て基準面より遠方に置く外挿法を適用することを提案した (図1)。外挿法では、計測対象よりも小さい基準面でも構わないので、外挿法により大型構造物の遠距離計測が可能になる。しかし、外挿法では一般に内挿法よりも計測精度低下は避けられない^[3]。

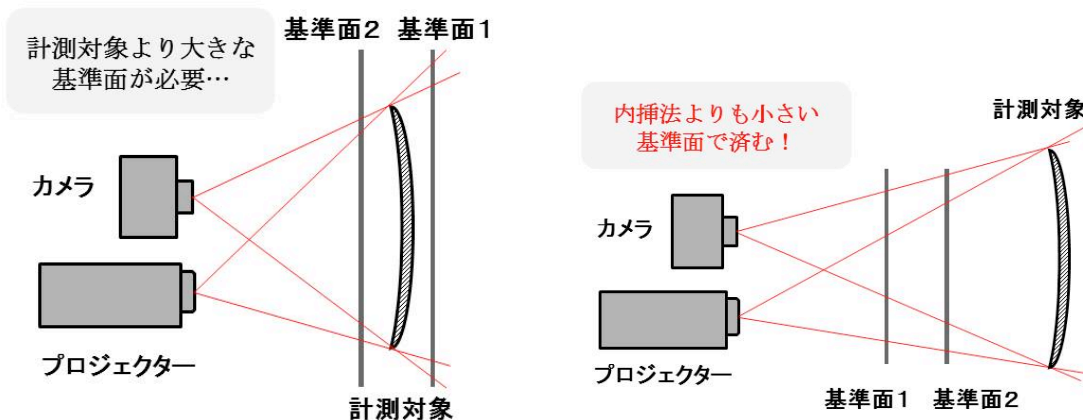


図1 格子投影法の内挿法 (左) と外挿法 (右) の基準面位置と計測範囲

2.2 位相と座標値の関係に多項式を用いる計測点位置算出法

内挿法では2枚の基準面の間に仮想的に空間座標系を作る。座標と投影位相の関係には線形補間を使っているが、線形補間はいくまでも近似である。2枚の基準面間隔を小さく取ると近似の精度は上がるが、計測できる表面形状の奥行きは減る。そこで、位置が既知である計測対象の測

定値をテーブル化しておき、測定値を補正すると外挿法であっても計測精度を向上できることを既報で示した^{[3][4]}。

2.3 位置算出法における幾何算出法

座標と投影位相の関係に線形補間を使わず幾何学的に厳密に計測対象の位置を算出する方法が幾何算出法であり、精度向上に大きく寄与した^[5]。

2.4 2カメラ法

カメラを2台用いて、2台のカメラの視線の交点を求めることでも幾何学的近似を用いなくて計測対象の位置を算出することができる(図2)。2カメラ法においても外挿法が可能である。以下、繰り返し誤差を1カメラ法と2カメラ法とで評価することにする。

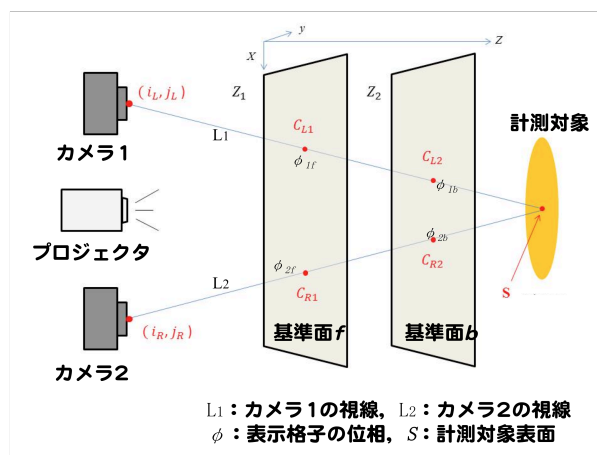


図2 2カメラ法の計測点位置算出の原理

2.5 大型面全体形状計測と区分的高精度形状計測

計測対象が大型構造物である場合、一度に全体の表面形状を計測するためには、外挿法による遠距離計測となるが、遠距離計測の計測精度は一般に低い^{[6][7]}。そこで、近距離から大型構造物の表面形状を区分的に高精度に計測し、その後に区分的形状データをつなぎ合わせて全体形状を高精度に再生する試みを行っている^{[1][2]}。

3. 位置計測の繰り返し精度

大型面全体形状計測を、区分的高精度形状計測データを繰り返してその後につなげて行く方法においては、形状データのみならず、つなげるために位置が高精度に計測できていなければならない。位置計測値の繰り返し精度が低いと、つなげる際の誤差要因となる。

ここでは、2カメラ法の外挿法により、

基準面撮影→平板撮影@40mm→平板撮影@50mm→平板撮影@60mm→…→平板撮影@120mm

を3回繰り返して、平板の位置(面上の計測点の平均値)を3回計測した。その結果を表1に示すとともに、1カメラ法との比較も示した。繰り返し計測における計測位置の3回の標準偏差は、全位置での平均値として、1カメラ法で0.114mm、2カメラ法で0.007mmとなり、繰り返し精度においては2カメラ法の方が優位であった。但し、位置の計測誤差においては1カメラ法の方が優位であった。

表1 外挿法における繰り返し計測誤差とばらつき

2カメラ法外挿法										
12月13日										
計測距離	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
1回目の誤差[mm]	1.843	1.851	1.87	1.913	1.985	2.104	2.25	2.369	2.523	
2回目の誤差[mm]	1.856	1.85	1.851	1.911	1.998	2.113	2.253	2.351	2.528	
3回目の誤差[mm]	1.881	1.878	1.869	1.924	1.988	2.124	2.258	2.366	2.527	
全3回の標準偏差[mm]	0.016	0.013	0.009	0.006	0.006	0.008	0.003	0.008	0.002	
12月17日										
計測距離	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
1回目の誤差[mm]	1.667	1.736	1.829	1.808	1.936	1.726	1.765	1.829	1.915	
2回目の誤差[mm]	1.643	1.723	1.848	1.824	1.918	1.767	1.833	1.915	1.913	
3回目の誤差[mm]	1.637	1.725	1.832	1.809	1.907	1.771	1.83	1.903	1.911	
全3回の標準偏差[mm]	0.013	0.006	0.008	0.007	0.012	0.020	0.031	0.038	0.002	
1月8日										
計測距離	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
1回目の誤差[mm]	-1.46	-1.427	-1.446	-1.47	-1.477	-1.521	-1.594	-1.632	-1.658	
2回目の誤差[mm]	-1.445	-1.434	-1.46	-1.465	-1.473	-1.52	-1.607	-1.622	-1.663	
3回目の誤差[mm]	-1.437	-1.461	-1.504	-1.507	-1.55	-1.577	-1.627	-1.633	-1.656	
全3回の標準偏差[mm]	0.010	0.015	0.025	0.019	0.035	0.027	0.014	0.005	0.003	
2カメラ法の標準偏差[mm]	0.003	0.004	0.008	0.006	0.013	0.008	0.012	0.015	0.001	
1カメラ法外挿法										
計測距離	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
1回目の誤差[mm]	-0.2613	-0.3477	-0.334	-0.3286	-0.3506	-0.3822	-0.4097	-0.568	-0.5014	
2回目の誤差[mm]	-0.5282	-0.432	-0.4745	-0.4743	-0.4762	-0.5409	-0.5929	-0.6039	-0.699	
3回目の誤差[mm]	-0.5955	-0.5816	-0.6457	-0.6176	-0.6552	-0.6068	-0.6494	-0.7335	-0.8657	
1カメラ法の標準偏差[mm]	0.144	0.097	0.127	0.118	0.125	0.094	0.102	0.071	0.149	

2カメラ法を用い、平板の位置を外挿方向に移動しながら外挿の程度に対する計測誤差を調べた。実験条件を図3に示す。実験結果を図4に示す。計測値とは4回計測の平均である。2枚の基準面間では位置誤差（平均）および平面度（計測値凹凸の標準偏差の平均）ともに良好であり、外挿の度合いが増えるほど位置誤差および平面度ともに悪化する傾向が確かめられた。この実験では、実験装置の大きさが卓上型なので、大型計測対象物においても検証する必要がある。

実験条件	
①基準面間距離	10mm
②カメラ間距離	1.3m
③基準対象物距離	5mm
④カメラ基準面間距離	1.8m
格子間画素数	16
位相シフト数	16

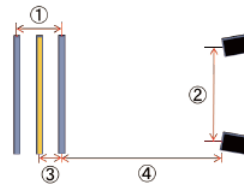


図3 外挿の程度による計測精度変化の実験条件

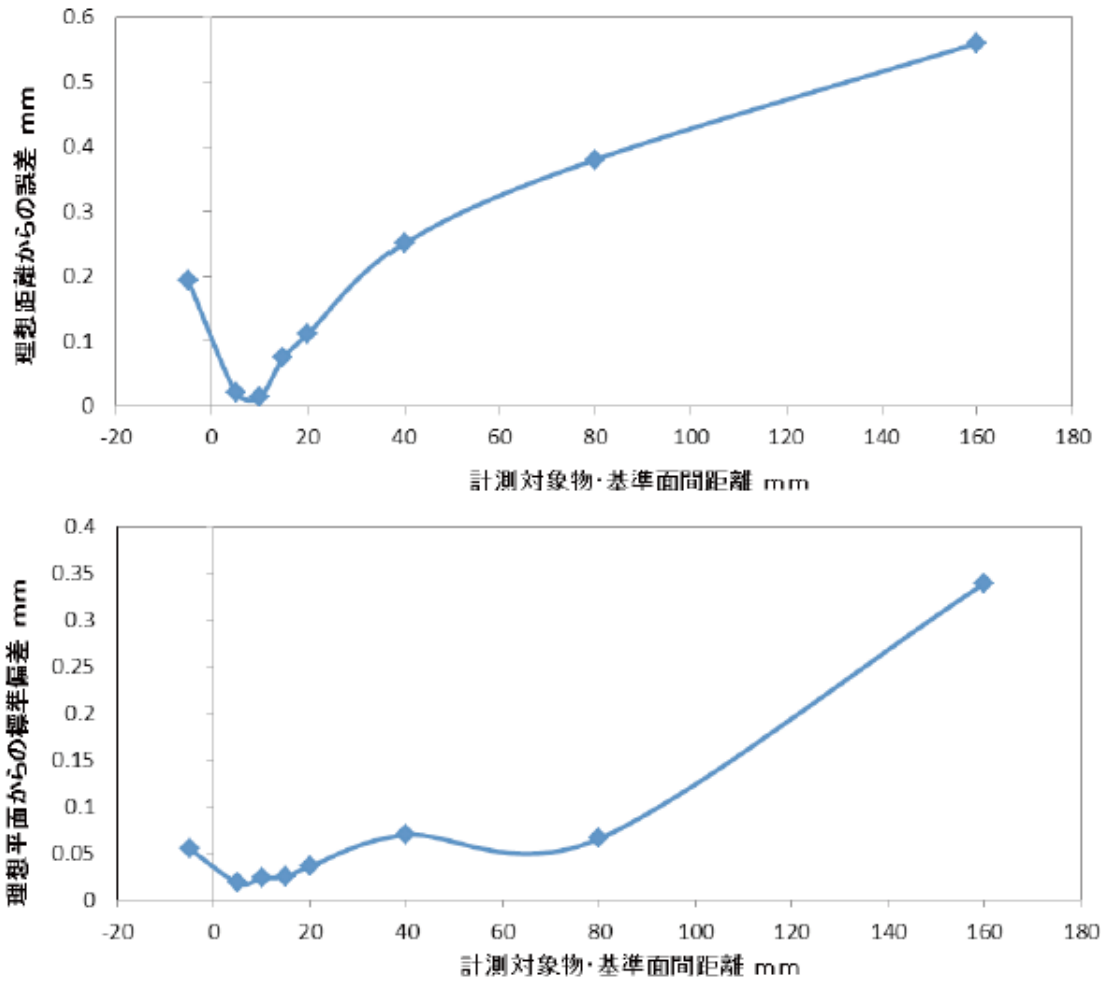


図4 外挿の程度による計測精度変化

2カメラ法の2カメラ間距離は計測精度に及ぼす影響が大きいと考えられ、2カメラ間距離をパラメータにした実験を行った。実験条件を図5に示す。実験結果を図6に示す。2カメラ間距離にはある適切な値があり、それより大きくても小さくても精度が悪化する。最も精度が良いのは、2カメラ間距離がカメラと基準面との距離に近い値の場合である。すなわち、2本の視線の交点から座標値を求める方法においては2本の視線が直角に交わる付近で精度が向上していることが確かめられた。

実験条件	
①基準面間距離	10mm
②カメラ間距離	Xm
③基準面对象物距離	5mm
④カメラ基準面間距離	1.8m
格子間画素数	16
位相シフト数	16

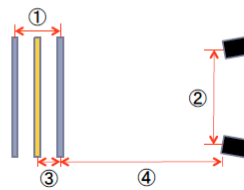


図5 2カメラ間距離による計測精度変化の実験条件

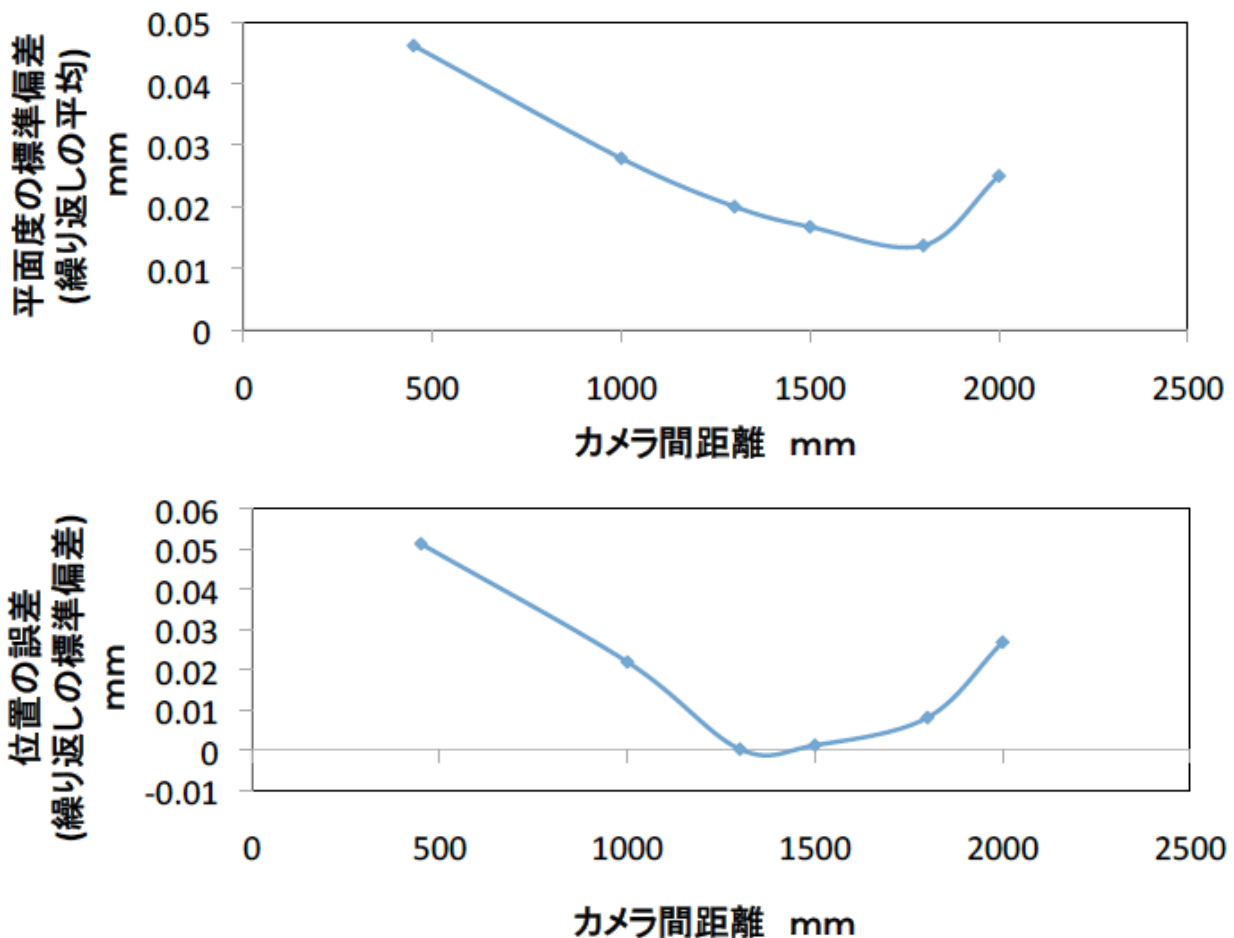


図6 2カメラ間距離による計測精度変化

4. 高精度計測の条件

一連の実験を通じ、計測原理から来る精度の他に、計測環境の重要性を認識した。2カメラ法実験装置として図7の装置を製作し実験した後に、精度向上のために図8の装置に改良した。さらに、摂南大学スタジオに図9に示す高精度実験装置を整備した。

まず、計測原理から来る精度制約を向上させるための方策として、初期設計した2カメラ法実験装置(図7)に、計測系フレーム構造の高剛性化、カメラの高解像度化、プロジェクターの高解像度化、を施して図8の実験装置とした。また、運用上の注意点として、適正と考え意図して設定した設定値が知らぬ間に自動的に変わって行く「意図しない適正化」を避けできるだけ避けるため、カメラの自動絞り機能の不使用と、プロジェクターの台形補正の不使用も行った。さらに、図9の共同実験用大型実験装置においては、計測における人の移動による振動や機器への接触を防ぐために、計測中の歩行の禁止、使用プロジェクター切り替え作業の無人化、使用カメラ切り替え作業の無人化、基準面(プラズマモニター)移動の遠隔操作化、などを行った。

これらの改良改善の結果、計測精度が大幅に向上したが、さらに計測精度を向上させるためには、建物の床の基礎の高剛性化と除振・防振、環境温度変化の抑制・制御、装置やフレーム構造の熱変形の抑制など、装置の整備の他に、試験環境の整備が非常に重要となってくることを痛感した。

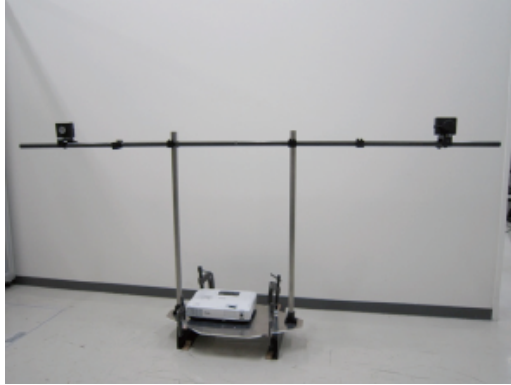


図7 2カメラ法卓上型実験装置
(初期設計)

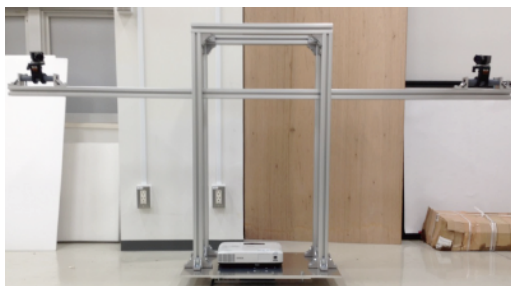


図8 2カメラ法卓上型実験装置
(高解像度カメラ、高剛性フレーム)

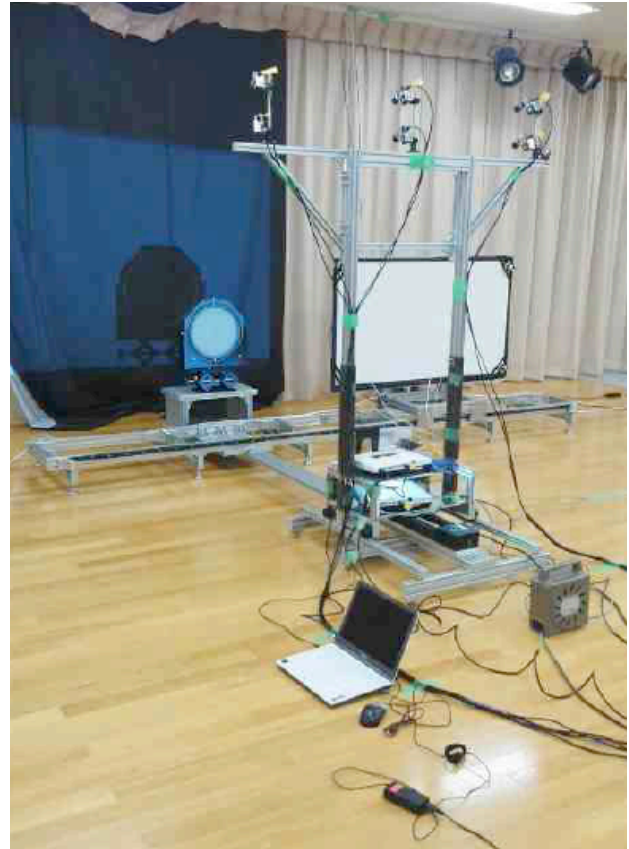


図9 格子投影法大型実験装置
(摂南大学における共同実験装置)

5. まとめ

大型構造物の表面形状計測を高精度に行うために、区分的に分割して表面形状を計測し、表面形状データをつないで行く場合には、つなぐための位置情報が必要になるので、一度の計測で精度良く計測できているのかの繰り返し精度が要求されるので、格子投影法2カメラ法により繰り返し計測精度を評価した。必要な繰り返し精度は、大型構造物の全体形状計測に要求される総合精度や、区分的データをつなぐ手法自体の精度に依存するものであるが、本稿では繰り返し精度の目安となるパラメータ変化の傾向が得られた。また、区分的形状計測の精度向上を狙って計測範囲を狭くすると、全体形状を再現するためにつなぐ回数が増え却って誤差要因となるため、計測範囲とつなぐ回数のバランスが今後の検討課題となる。

参考文献

[1] 岩佐貴史, 小野静之, 後垣雄太, 岸本直子, 相原弘匡, 似鳥 透, 樋口 健, 小木曾望, 藤垣元治, ISAS戦略開発費高精度計測チーム: 点計測と面計測を統合した大型宇宙構造システムの表面形状計測法に関する検討実験, 第55回構造強度に関する講演会, 2A07, JSASS-2013-3051, pp. 139-141, (2013. 8. 7-9), 室蘭.

- [2] 岩佐貴史, 原田 卓, 岸本直子, 亀井宏貴, 樋口 健, 相原弘匡, 吉川隆章, 田中宏明, 石村康生, 古谷 寛: 高精度大型宇宙構造システムの開発研究～高精度形状計測技術の開発～, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, 第14回宇宙科学シンポジウム, ISAS/JAXA相模原, (2014. 1. 9).
- [3] 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, JSASS-2011-4441, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3A04, (2011. 11. 30-12. 2), 松山.
- [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. 1-3), 熊本.
- [5] 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. 20-22), 別府.
- [6] 樋口 健, 岩佐貴史, 岸本直子, 岩井達也, 似鳥 透: 2カメラを用いた格子投影法による表面形状計測, 第 28 回宇宙構造材料シンポジウム, ISAS/JAXA 相模原, (2012. 12. 4).
- [7] 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. 7-9), 室蘭.