研究論文

g 摂南大学融合科学研究所論文集、第 2 巻 第 1 号、(2016)

画像計測による古代瓦の 3 次元形状計測[1]

Surface Shape Measurement of an Ancient Roof Tile Using Two Different Image Measurement Methods

岸本直子[2] 摂南大学理工学部 機械工学科

KISHIMOTO, Naoko Department of Mechanical Engineering, Setsunan University

Abstract

This paper presents comparison of surface measurement results of an ancient Korean roof tile using two different image measurement methods recently used in various fields. One is grating projection method developed for capturing three dimensional surface shapes at high speed and with high precision. The other is Structure from Motion (SfM) and Multi-Vision Stereo (MVS) method, one of photogrammetry system, used in computer vision and recently in archaeology. In both methods, hardware configuration is simple and low cost such as commercially available digital cameras or projectors. In this paper, we quantitatively evaluate matching degree between two measured results.

キーワード: 画像計測、格子投影法、写真測量

Keywords: image measurement, grating projection method, photogrammetry

1. はじめに

近年、宇宙機に搭載される太陽電池パネルや宇宙用アンテナなどの大型機器には、発電量の増加や感度向上のため、さらなる大型化と高精度化が求められている。大型化に対応する基礎技術には、膜面構造や展開型分割鏡が有効であり、高精度化に対応する基礎技術には、環境変動に対して形状安定性の優れた素材の利用(1)や高精度展開ラッチ(2)などが有効であると考えられる。さらに大型高精度構造物の実現には、１０ｍを超えるような大型構造物を形状の要求精度以上に高精度計測する技術の開発が不可欠である。著者らは、これまで軌道上での高精度計測も視野にいれた計測法の研究開発をおこなってきた(3)-(5)。これまで扱ってきた手法は、構造物の動的挙動の計測ができることを前提として、構造物に投影あるいは描画した格子パターンの位相を解析して、構造物表面の 3 次元形状を高速かつ高精度に計測する手法であった。

様々な分野で利用される代表的な非接触 3 次元形状計測法には、主にレーザースキャンと写真計測（Photogrammetry）システムがある。レーザースキャンは、地形や建造物の測量で実用化されている(6)、(7)が、価格が数百万円以上と高価であることやレーザー光でスキャンするため原理的にスキャン速度以上の動的

1 【原稿受付】2016 年 8 月 17 日、【掲載決定】2016 年 10 月 6 日

2 岸本 直子 摂南大学、准教授 e-mail: kishimoto@mec.setsunan.ac.jp

〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8、摂南大学理工学部 機械工学科

現象は計測できない。また大面積を高精度に計測するにはハードウェアの性能向上が必要である。写真測量にはパターンを投影する能動法と複数台のカメラ（あるいは複数枚の画像）を使う受動法がある。いずれもカメラやプロジェクターを組み合わせた簡便な構成で、比較的安価に高精度計測システムを構築することができる。著者らがこれまで扱ってきた格子投影法は能動法に該当する。受動法のうち高精度計測システムには計測対象物にマーカーを貼付する手法(8)が利用されるが、近年のデジタルカメラの画素数増加や画像処理用の計算機の能力向上により、撮影画像内の特徴点探索やマッチングによって画像そのものから高精度に形状を計測する手法も手軽に利用できるようになってきた。最近では、遺跡から出土した文化財の３次元計測(9)やドローンからの空撮画像を使って、建物や遺跡の形状を復元する事例(10), (11)も数多く報告されている。従来、画像内の特徴点を用いる手法では、レーザースキャナによる手法よりも精度が劣ると考えられていたが、前述のようにカメラの画素数や計算機能力の向上により、高精度な計測も可能となってきた(12)。そこで、本論文では、著者らがこれまで扱ってきた格子投影法と、受動的写真測量である Structure from Motion（SfM）- Multi-Vision Stereo（MVS）法の２つの手法で、文化財である古代瓦の３次元形状を計測し、計測結果がどの程度一致しているか評価した。

２. 画像計測法の原理と特徴

2-1　格子投影法の概要

格子投影法は、プロジェクターから被計測物に投影した格子画像をデジタルカメラで撮影し、その位相を解析することで被計測物の 3 次元位置座標を高精度に計測する能動的写真測量法である。また著者らが取り組んできた格子投影法は、基準面を用いてキャリブレーションを行うことで、カメラとプロジェクターのレンズ収差の影響がないことが特徴である。図１に格子投影法による計測原理の概要を示す。図１（a）に 2 枚の基準面間に被計測物をおいて計測する方法を示す。計測座標系は基準面内に xy 軸、基準面の垂直方向に z 軸をとる。ここで、カメラの視線と 2 枚の基準面 1、2 との交点の位置座標を(x_1, y_1, z_1)、(x_2, y_2, z_2) ならびに、プロジェクターから基準面 1、2 に投影される格子の位相を ϕ_1、ϕ_2 とする。そして、カメラの視線と被計測物との交点の位置座標を(x, y, z)、プロジェクターから投影される格子の位相を ϕ とすると、被計測物の位置座標は、以下の式で求めることができる。

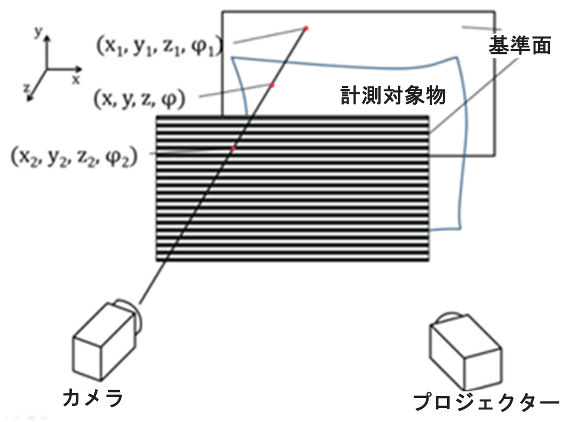
$$x = \frac{\phi - \phi_1}{\phi_2 - \phi_1}(x_2 - x_1) + x_1$$

$$y = \frac{\phi - \phi_1}{\phi_2 - \phi_1}(y_2 - x_1) + y_1$$

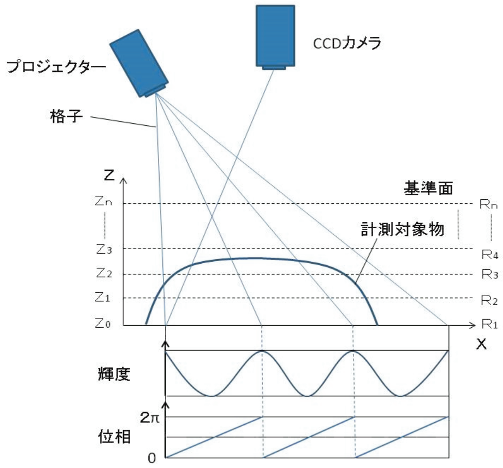
$$z = \frac{\phi - \phi_1}{\phi_2 - \phi_1}(z_2 - z_1) + z_1$$

この式より、あらかじめキャリブレーションで基準面の 3 次元位置座標と位相を求めておけば、被計測物に投影された格子の位相を算出するだけで、被計測物の３次元位置座標を求めることができる。被計測物に投影された格子の位相解析法には，高精度計測のため時系列に複数の画像を用いる位相シフト法を用いた。さらに基準面の枚数を増やすことで精度を維持したまま計測空間を拡張する全空間テーブル化手法を採用した。概要を図１(b)に示す。一枚の基準面をリニアスライダで移動させて，複数枚の基準面とする。また，全画素における投影格子の位相と空間内の 3

次元座標の対応表をキャリブレーション時にあらかじめ構築しておき、計測時には位相値から座標を呼び出すことで高精度かつ高速計測が実現される。



（a）計測原理



（b）全空間テーブル化手法

図 1　格子投影法の計測原理

さらに本研究では、カメラとプロジェクターから構成される計測系を複数台用意し、別々の方向から計測することで、カメラからの死角を減らし、3 次元空間内での計測範囲を拡張する全周計測装置(13)を用いた。複数台の計測系で重複して計測される部分は、計測点数が足しあわされるため、画素数の少ないカメラでも解像度が増加する効果もある。全周計測装置の外観を図 2 に示す。3 次元形状データは、計測系 1 ～ 3 の 3 種類得られるが、3 次元空間内の位置を合わせるために、キャリブレーション時に基準面中心の位置を基準面モニタに表示しこれを共通の原点とする。計測実験に用いた計測系および基準面の仕様を表 1 に示す。

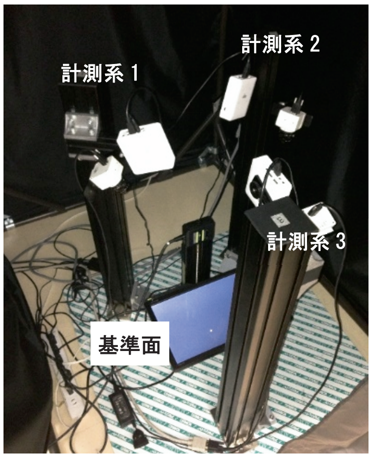


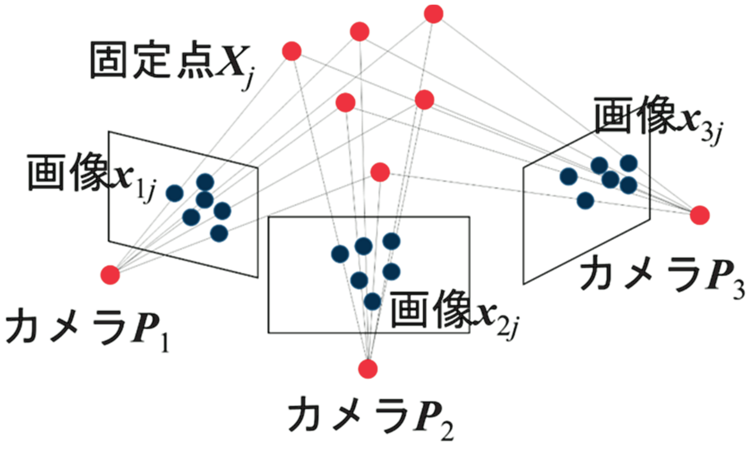
図　2　 全周計測装置

表 1　 計測系および基準面の仕様

	メーカー・型番	仕様
カメラ	SENTECH　STC-CMB4M	解像度：640×480[pixels]
プロジェクター	Aigo　PT6316L	解像度：1024×768[pixels]
リニアステージ	SIGMA KOKI　SGSP26-200	繰り返し位置決め精度：6um
基準面	BENQ　G615HDPL	解像度：1366×768[pixels]

2-2　SfM-MVS 法の概要

Structure from Motion (SfM)では、適切な条件で撮影された 1000 万画素を超える撮影画像の特徴分析から、n 個（通常、数百～数千）の固定点を抽出する。3 次元空間内の n 個の固定点群を撮影した m 枚の 2 次元画像が得られたとき、次式の $m\times n$ 個の対応関係 $\mathbf{x}_{ij}$ から、m 個の写像行列 $\mathbf{P}_i$（カメラの位置や向きなどを示すカメラパラメータ）と n 個の固定点の 3 次元座標 $\mathbf{X}_j$ を推定する。図 3 に SfM の概念図を示す。



$$\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{P}_i\mathbf{X}_j \quad ただし、i=1、\ldots,m、j=1,\ldots,n$$

図３　SfM の概念図

ステレオ視の原理によれば、同一の固定点群について異なる位置にある 2 台のカメラの画像において対応点をとれば、固定点群の 3 次元位置を求めることができるが、Muti-Vision Stereo では 3 枚以上の画像を使ってより高精度かつ高密度な点群の 3 次元座標を算出する。

本研究では、デジタル一眼レフ Canon EOS Kiss X8i で撮影した 2400 万（6000×4000）画素の複数の TIFF 画像を、入手しやすい SfM-MVS を使ったソフトウェア Agisoft Photo Scan Professional Ver.1.2.4 で解析した。解析には、画像処理に適したノートパソコン DOSPARA Prime Series（Intel Core i7-2760QM、 RAM16GB、NVIDIA GeForce GTX560M) を使用した。また、画像計測で得られるデータは、数十万～数千万以上に及ぶ点群の xyz 座標値や色情報であるため、データ処理にはフリーの 3 次元点群用編集・解析ソフトウェア Cloud Compare 2.6.1 を用いた。

2-3　計測精度の評価

前述の２つの画像計測法の計測精度を評価するため、図４に示すステンレス製段差ゲージを計測した。格子投影法の計測条件は、位相シフト 16 回、投影格子幅 8mm、基準面間隔 0.5mm、基準面枚数 91 枚、基準面間補間 1500 点である。SfM-MVS 法では、2400 万画素の TIFF 画像 40 枚から形状を算出し、段差ゲージの幅と高さの実測値から実空間内でのスケールを設定した。格子投影法の計測結果を図５に、SfM-MVS 法の計測結果を図６に示す。

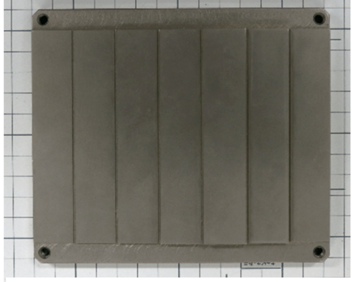


図４　段差ゲージ

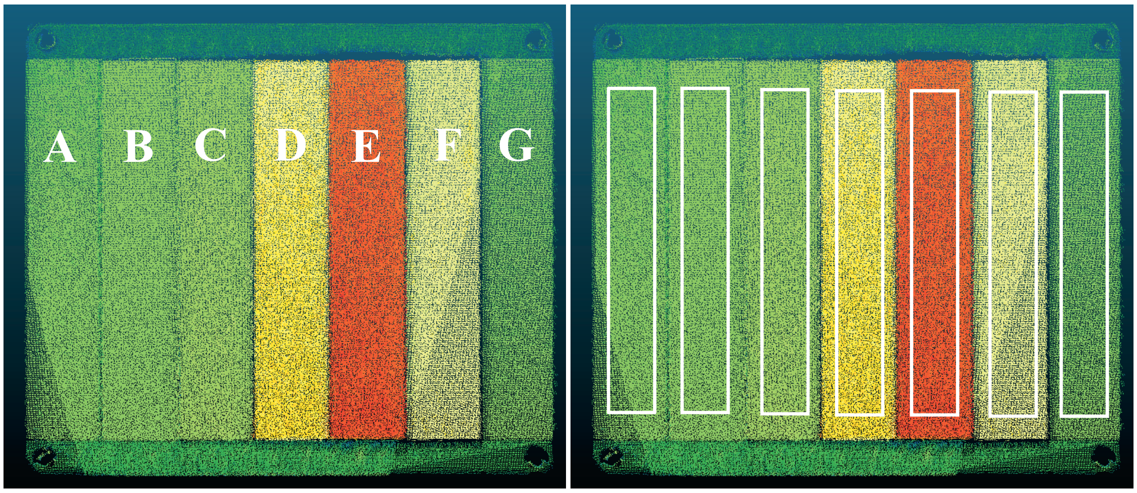


図５　格子投影法による段差ゲージの計測結果

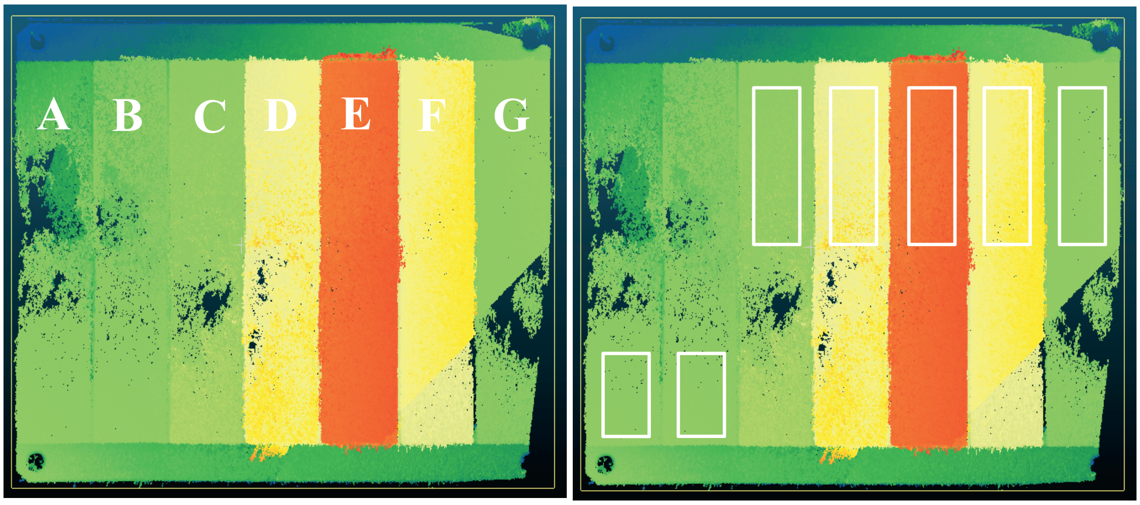


図６　SfM-MVS による段差ゲージの計測結果

図５に比べて図６の方が高密度であるが、データが大きく欠損している部分も存在している。図中に示したA～Gの段差のうち、Gの高さをゼロとしたA～Fの高さを表２に示す。表には、接触式３次元計測装置（精度±2μm）で計測した段差（各段の面内６点の平均値）もゲージ段差として示した。計測値の標準偏差で示される計測精度は、格子投影法での計測結果では173～231μm、SfM-MVS 法での計測結果では83～174μm となっている。ただし、計測値の平均値とゲージ段差との差で示される計測確度は、格子投影法での計測結果では計測精度の範囲内であるのに対し、SfM-MVS 法での計測結果では場所によって著しく劣る結果となった。撮影画像内の特徴点を用いるSfM-MVS 法では、撮影画像の質の影響を受けやすく，特に段差ゲージが特徴点の少ない平坦面で構成されていることや幅方向（約140㎜）に比べて高さ方向のレンジ（約5.5㎜）が小さいことが原因で、計測データの欠損や劣化が発生したと考えられる。

表２　格子投影法および SfM-MVS 法による段差ゲージの計測値

		A	B	C	D	E	F	G
ゲージ段差[mm]		0.001	0.500	1.501	3.500	5.494	2.999	0.000
格子投影法	点数	35,595	31,929	31,326	31,738	33,043	33,043	17,144
	平均値[mm]	-0.060	0.474	1.428	3.536	5.471	3.008	0.000
	標準偏差[mm]	0.2240	0.2313	0.2309	0.2170	0.2051	0.2096	0.1727
SfM-MVS 法	点数	502,409	444,411	854,333	770,736	746,466	695,530	828,030
	平均値[mm]	-0.536	-0.081	0.442	2.995	5.204	2.984	0.000
	標準偏差[mm]	0.1218	0.1347	0.1741	0.1166	0.0829	0.0993	0.1116

３. 計測対象物と計測結果

3-1　計測対象物

計測対象物の写真画像をもとに表面形状を計測する画像計測法では、一般に、金属などの光沢面やガラスなどの透明な面をもつ物体の計測には、照明などの工夫が必要である。異なる計測法による計測結果の評価を目的とする本論文では、照明などの影響を受けにくい 8 世紀の韓国（統一新羅時代）の軒丸瓦（図 7、直径約 180 ㎜、大阪市立大学蔵）を計測した。

図 7　計測対象の古代軒丸瓦

3-2　格子投影法による計測結果

図２の全周計測装置を用いて軒丸瓦を計測した。計測条件は、位相シフト 16 回、投影格子幅 8mm、基準面間隔 0.5mm、基準面枚数 91 枚、基準面間補間 1500 点である。すなわち、z（高さ）方向の計測可能空間は 45mm、分解能は 30µm である。図 8 に計測系 1 ～ 3 の計測結果を示す。計測系 1 ～ 3 のデータ点数はそれぞれ、305,930 点、294,115 点、258,829 点である。

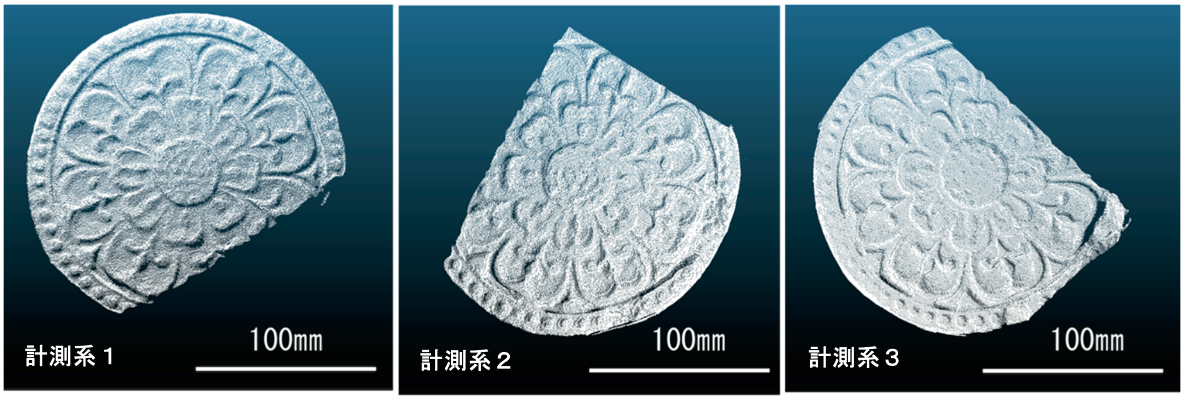


図 8　格子投影法による計測結果（各計測系の計測データ）

３つの計測データは、前述した基準面中心の位置を原点とする方法で位置合わせ可能であるが、より高精度に位置を合わせるために、図の計測データそのものを使って点群間距離の総和を最小化する Iterative Closest Point（ICP）法でマッチングをおこなった。この場合でも、初期状態において３つの計測データ間の距離が大きすぎると局所最適解に陥りやすいので、あらかじめ基準面中心位置を原点とする位置合わせの結果を初期値とすることが有効である。３つの計測データの合成結果を図９に示す。図は z 座標値に応じて色付けしている。

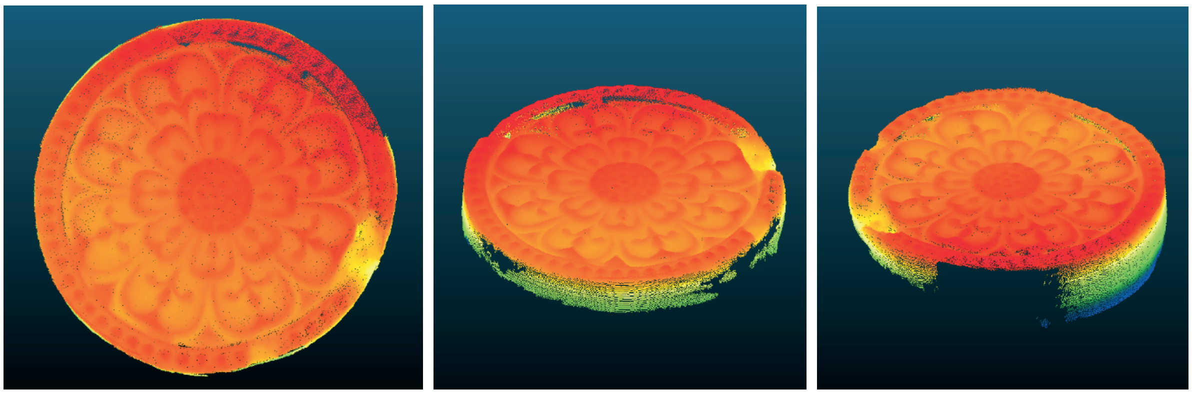
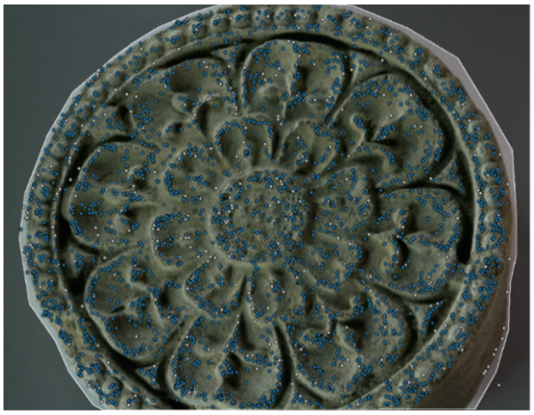


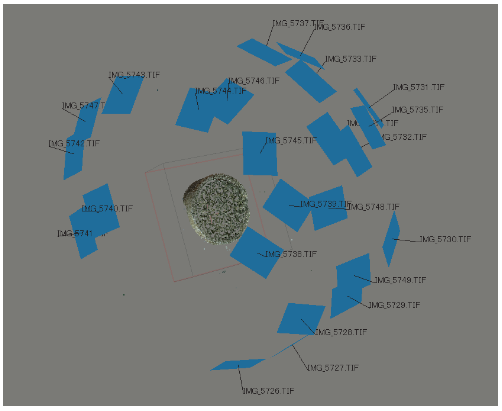
図９　格子投影法による計測結果（３つの計測系の合成結果）

3-3　SfM-MVS 法による計測結果

市販のデジタル一眼レフで図 7 の軒丸瓦の写真を 24 枚撮影した。撮影画像の特徴点抽出と対応点探索によって 10,939 点の固定点と、24 台のカメラの位置と向き（カメラパラメータ）を算出した。特徴点抽出例とカメラパラメータの推定値を図 10 に示す。次に計測対象物上の同一領域に対して 3 台以上の複数のカメラによる撮影画像の情報を用いて高密度な点群の座標値を高精度に算出する。今回は、10,955,567 点の座標値を算出した。図 11 にテクスチャ付きの計測結果、図 9 に形状のみの結果を示す。図 12 は、図 9 同様、z 座標値に応じて色づけしている。ただし、相対的な形状のみを示しており、3 次元実空間内でのスケールは入っていない。一般に、実空間内でのスケールは、同時に撮影したキャリブレーションバーや実空間内における 4 点以上の座標値から求めるが、本研究では、後述するように格子投影法での計測結果とのマッチングにより求めた。



(a) 抽出された特徴点の例



(b) カメラパラメータの推定結果

図 10　抽出された特徴点とカメラパラメータの推定結果

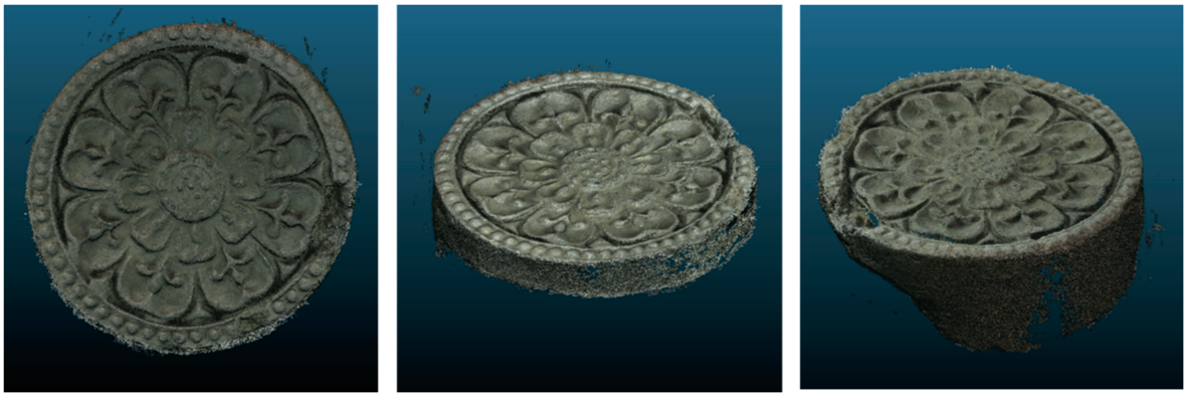


図 11　SfM-MVS 法による計測結果（テクスチャデータ付き）

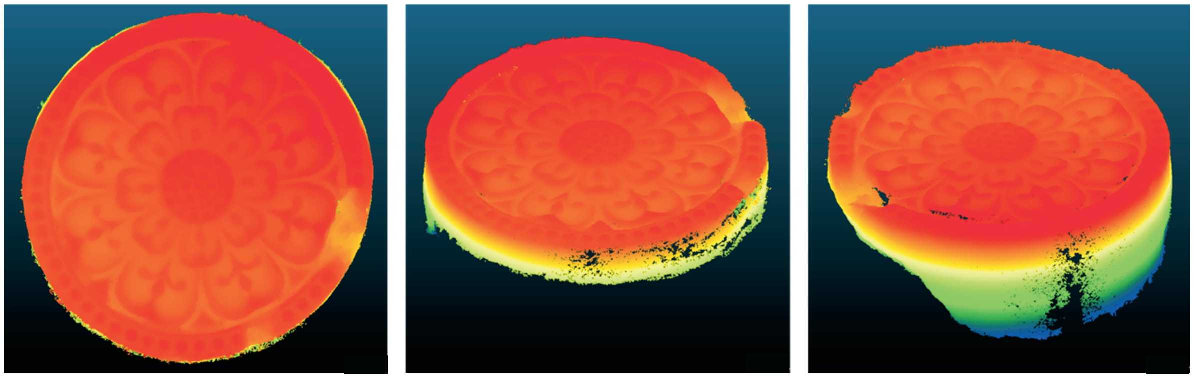


図 12　SfM-MVS 法による計測結果（形状データのみ）

3-4　計測結果の比較と考察

格子投影法での計測結果（図 9）と SfM-MVS 法での計測結果（図 12）とを比較するため、ICP を使って後者の位置とスケールを実空間内での座標値をもつ前者に合わせた。その後、両者の点群間の距離を計算した。図 13 に距離の分布を示す。距離が 2. 0 ㎜以上となる点はすべて赤く表示されている。計測点群数は、格子投影法で 858,874 点、SfM-MVS 法で 10,955,567 点と 10 倍以上の差がある。これは主に、使用したカメラの画素数の違いを反映している。２つの点群間の距

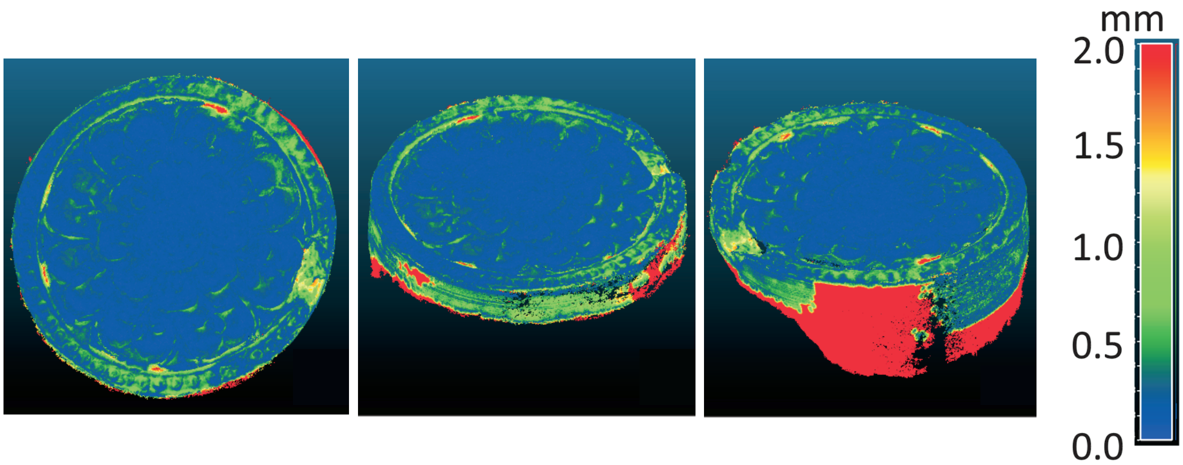


図 13　格子投影法と SfM-MVS 法による計測結果の距離分布

離は、一方の点群の各点に対して他方の点群の最も近い点との距離を計算するため、格子投影法による計測結果のうち３つの計測系で共通して計測された点群密度が高い領域では、距離が 0.5 ㎜以下となっている。逆に、図 9 あるいは図 12 においていずれかの点群が疎になっている、あるいは計測点のない領域では、距離が大きい。

基準面を使った全空間テーブル化による格子投影法は、2-1 節で示したように基準面をスライダで移動させながら全画素における位相値と座標の対応表を構築するキャリブレーションが必要である。高精度計測には基準面間隔を小さくしなければならないので、このキャリブレーションには、１～2 時間程度の時間を要する。しかし、この対応表ができてしまえば、ほぼリアルタイムの計測が可能で、その場で計測結果を確認できる。一方、SfM-MVS 法は、いろいろな方向から計測対象物の写真を撮影するだけであるが、高精度・高密度の点群データの計算には、計算機の能力にもよるが数時間以上の時間を要する。通常静止している文化財の形状計測においては、リアルタイム計測はあまり重要でないが、博物館等での収蔵品や施錠されている遺跡内部を計測する機会が一般に限定されていること、画像計測は撮影された画像の質（照明やピント）などの影響を受けやすく、レーザースキャンに比べて、安定性に課題があるということからも計測結果がすぐに確認できることは実用上重要である。

いずれの計測法においても、カメラやプロジェクターの解像度の向上によって、点群の高密度化や高精度化が期待できる。また、数千万点を超える高密度点群のデータは、通常の PC では 3 次元表示すら困難な場合もある。しかし、近年、ゲームや動画編集、大規模数値計算用に高性能な GPU や GPU コンピューティング技術の進歩が著しく、データ処理速度の高速化も期待される。

４.まとめ

宇宙アンテナなどの大型構造物の高精度計測のために著者らがこれまで扱ってきた格子投影法と、受動的写真測量である Structure from Motion（SfM）-Multi-Vision Stereo（MVS）法の２つの画像計測法で、文化財である古代瓦の 3 次元形状を計測し、計測結果がどの程度一致しているか評価した。主に使用したカメラの画素数の違いから、格子投影法で得られた点群数と SfM-MVS 法で得られた点群数には 10 倍以上の差があるが、十分な密度の点群が得られた領域においては、形状計測の精度は同程度であることが明らかとなった。いずれの手法も市販の安価なカメラやプロジェクターを利用した簡便なシステムで、こうした光学機器の性能向上に伴い、計測精度の向上も期待できる。また、図面の代わりとなるアーカイブとしての計測だけでなく、得られた数千万点以上の膨大な 3 次元座標データを使った文化財の形状評価や解析法の提案もしていきたいと考えている。

参考文献

(1) 池谷俊、小山昌志、後藤健、向後保雄 、「高精度構造用 CFRP ハニカムサンドイッチパネルの特性評価」、第 31 回宇宙構造・材料シンポジウム、（2015）

(2) Ogi, Y., Teduka, Y., Tanaka, H., Miyasaka, A., Kawaguchi, K., “High-Precision Positioning of Flexible Deployable Structures Using Kinematic Couplings”, *Proceedings of International Conference on Adaptive Structures and Technologies* (ICAST2015), (2015)

(3) Iwasa, T., Hiramatsu M., Kishimoto N., Higuchi, K., Fujigaki M., “An Error Elimination Method for Surface Shape Measurement using the Grating Projection Method”, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, 12-ists29 (2014), pp.81-88.

(4) 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、13（2014）、pp. 61-70.

(5) 岩佐貴史、岸本直子，樋口健，藤垣元治，小木曽望、「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、14（2015）、pp. 95-103.

(6) http://www.faro.com/ja-jp/products/3d-surveying（2016 年 8 月 16 日閲覧）

(7) http://www.leica-geosystems.co.jp/jp/HDS_5570.htm（2016 年 8 月 16 日閲覧）

(8) http://www.geodetic.com/v-stars.aspx（2016 年 8 月 16 日閲覧）

(9) 金田明大、木本拳周、川口武彦，佐々木淑美、三井猛、「文化財のための三次元計測」、岩田書院、（2010）

(10) Colomina, I. and Molina P., “Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92 (2014), pp.79-97.

(11) 軍艦島３Ｄプロジェクト http://ilem.jp/research/gunkanjima/（2016 年 8 月 16 日閲覧）

(12) Skarlatos, D and Kiparissi S., “Comparison of laser scanning, photogrammetry and SFM-MVS pipeline applied in structures and artificial surface”, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Vol.1-3, (2012), pp.299-304.

(13) 伊丹大地、中尾耕、岸本直子、「全周計測装置の改良と膜面の三次元計測」、第 22 回スペースエンジニアリングコンファレンス（SEC’13）、（2013）