

## 2 種の 3 次元レーザースキャナを用いた壁面・空間の記録

宮下明珠<sup>\*1</sup>, 江藤 望<sup>\*1\*2</sup>

### Spatial and Surface Roughness Measurement Using Two 3D Laser Scanners

Mitsumi Miyashita<sup>\*1</sup> and Nozomu Etoh<sup>\*1\*2</sup>

The two scanners, Z+F imager 5010 and Konica Minolta Range5, were used for this year survey. In the previous year, TOPCON GLS-1500 was used for spatial measurement. But it is difficult to use in the narrow and complex space. To be suitable for this year's survey, we decided to use Z+F imager 5010 instead of GLS-1500. For surface roughness measurement, we used same instrument as last year. These two scanners were used in the three churches, and made great efficient to our project.

**Key Words:** 3D laser scanner, Range5, Z+F imager

**キーワード:** 3 次元レーザースキャナ, Range5, Z+F imager

#### 1. はじめに

3 次元レーザースキャナは、広義には実在する立体物にレーザー光を照射して、その形状を短時間で精密に計測し、計測された 3 次元データをコンピュータに保存するものと定義される。立体物をスキャンして得られる 3 次元データをコンピュータに取り込んで解析することが可能なことから、3 次元レーザースキャナは早くから情報処理、医療、美術工芸品や文化財の保存・管理の分野で活用され、各分野で研究が活発に進められてきた。また、工業分野においても、製品開発や製造のリードタイムを短縮しようとする取り組みに注目が集まってきている近年では、リバースエンジニアリングや製品検査などにも活用範囲が拡大してきている。

金沢大学フレスコ壁画研究センターでは、日伊共同で実施している南イタリア中世壁画群診断調査プロジェクトにおいて、特性の異なる 2 種類の最新 3 次元計測機器(レーザースキャナ)を使い分け、高精度に診断調査したデータをデジタル・アーカイブ化することで、可能な限りの空間記録として壁画をバーチャル・リアリティ豊かな歴史的文化財として保存したいと考えている。

#### 2. 2 種類のレーザースキャナ

レーザーを利用した 3 次元計測機器は、その用途や計測方式により、「(狭義の) レーザースキャナ」と「デジタイザ」に分類することができる。

#### 2.1 レーザースキャナ

レーザースキャナと称される 3 次元計測機器は、タイム・オブ・フライト方式と位相差方式のどちらかの計測システムを採用している。タイム・オブ・フライト方式とは、レーザー光の往復した時間と照射方向により、距離と角度を割り出して 3 次元データを取得する方式である。このタイム・オブ・フライト方式のレーザースキャナは、建築物や広範囲に及ぶ遺跡などの空間を計測するのに適している。その計測精度はおよそ 0.1~25mm、計測範囲は 35~6000m である。一方、位相差方式は、レーザー発光時と受光時の位相差により距離を算出する方式であり、タイム・オブ・フライト方式と同程度の性能をもっている。

昨年度は、GLS-1500 (TOPCON) を用いて、壁画空間の 3 次元スキャニングを行い、診断・調査結果を組み込むデジタル・アーカイブの基盤として利用した。GLS-1500 の仕様を Table1 に示す。150m 離れた地点からの計測でも、誤差は 4mm 以内に抑えられており、最大 500m 離れた距離から計測できるというスペックは、まさに短・中距離用の 3D レーザースキャナといえる。GLS-1500 (TOPCON) の特徴を活かし、グラヴィーナ・イン・プーリアにおける昨年度の調査では、約 150m 離れた峡谷の対岸からサン・ミケーレ・デッレ・グロッテ教会を容易に計測することができた。またサン・ヴィート・ヴェッキオ教会(元の場所)では、教会の東約 150m の先に広がる凝灰岩台地の(石切場として地下深く採石されたために形成された断崖の)絶壁をスキャニングし、断崖上部と教会上部の位置をつなぎ合わせることで、サン・ヴィート・ヴェッキオ洞窟教会が建設(掘削)された当時の教会周辺の地形的状況をリアルに可視化して再現することができた。このように GLS-1500 (TOPCON) は中距離計測で十分な威力を発揮した一方で、垂直方向では水平方向を 0° とした場合、上下に各 35° しか測定することができないために、狭い洞窟空間の計測は苦手というデメリットもあった。

\*1 フレスコ壁画研究センター

\*2 人間社会研究域 学校教育系

\*1 Research Center of Italian Mural Paintings

\*2 Institute of Human and Social Sciences, Faculty of Education

したがって、現地調査に赴く以前に、狭い洞窟教会内での計測を可能にすべく、あらかじめ新型雲台の設計開発を独自で行って計測に支障がないように準備しておいたのだが、実際のフィールドでは約 30kg のスキャナ（本体 16kg+ 雲台 12kg）を計測地点を変えるたびに移動させるのはなかなか大変な作業であった。

Table 1 GLS-1500 の主な仕様

スキャニング部	
測定方式	タイム・オブ・フライト方式
測定距離	500m
スキャンスピード	30,000点/秒
測定範囲	±35°（鉛直）、360°（水平）
外観	
寸法	240(D) X 240(W) X 566(H) mm
質量	16kg（バッテリー、基盤除く）
電源部	
作業時間	4時間

今年度の調査対象である洞窟教会は、3 か所とも昨年度より狭い室内空間で、壁面には複数の削り型壁龕が設けられた複雑なプランをしていることが、すでに予備調査の段階でわかっていた。つまり、3 次元スキャニング作業においては明らかに昨年度以上の大きな困難が予想されたのである。このため、今年度は狭い空間のスキャニングに適した短距離用レーザースキャナの機種を新たに開拓することにした。Table2 に、主な距離用レーザースキャナの機種を示す。

Table 2 主なレーザースキャナ

製品名	精度 (mm)	計測距離 (m)	計測範囲(°)		方式
			水平方向	垂直方向	
Leica					
Scanstation C10	4	300	360	270	タイム・オブ・フライト方式
Scanstation C5	4	35	360	270	タイム・オブ・フライト方式
HDS620	5	80	360	310	位相差方式
HDS7000	0.1	100	360	320	位相差方式
RIEGL					
VZ-4000	15	4000	360	60	タイム・オブ・フライト方式
VZ-1000	8	1400	360	100	タイム・オブ・フライト方式
VZ-400	5	550	360	100	タイム・オブ・フライト方式
LPM-321	25	6000	360	150	タイム・オブ・フライト方式
Faro					
LS840	0.6	40	360	320	タイム・オブ・フライト方式
LS880	0.6	76	360	320	タイム・オブ・フライト方式
Focus3D	2	150	360	305	位相差方式
Photon 120	2	153	360	320	位相差方式
Photon 20	2	153	360	320	位相差方式
Nikon Trimble					
Trimble FX	1	70	360	270	タイム・オブ・フライト方式
Trimble CX	3	80	360	300	タイム・オブ・フライト方式
Z+F					
Imager5010	0.1	187	360	320	タイム・オブ・フライト方式
Imager5006h	0.1	79	360	310	位相差方式
Optech					
ILIRIS-3D	7	1200	40	40	タイム・オブ・フライト方式
TOPCON					
GLS-1500	4	330	360	70	タイム・オブ・フライト方式

検討の結果、GLS-1500 と同じタイム・オブ・フライト方式で、垂直方向の計測範囲の広い Z+F 社の Imager5010 を使用することにした。これは、昨年 9 月 20 日に開催され、筆者自身も研究発表を行った「レーザー・スキャナ技術の応用」（ジェノヴァ大学工学部の地域環境工学科主催）に関する研究会の会場において、研究会後にデモンストレーションのあった最新型の機種である。Imager5010 の主な仕様を Table3 に示す。Table1 に示した GLS-1500 の仕様と比較すると、測定距離は短くなったが、スキャニングの速度は Imager5010 の方がはるかに優れていること

がわかる。なお、Table4 は GLS-1500 と Imager5010 の計測密度と時間の関係を示している。それぞれが異なる基準で表示しているため、Imager5010 では壁面から 5m の距離での計測密度に計算し直して、両機種の比較の便を図った。

昨年度は、計測密度を 2.0cm にすることで、1 回の計測時間を 21 分 50 秒で行うようにして、何とか計測時間を短縮しようと努力したが、Imager5010 を使った場合には、同じ計測密度 2.0cm で 26 秒しかかからない。Imager5010 をレンタル導入した今年度の調査では、計測密度 0.3cm という高解像度（高精度モード）でスムーズに計測を行うことができた。ちなみに、この高精度モードでも 1 回に 6 分 44 秒しかかからず、Imager5010 の導入によって、昨年度以上に詳細な記録と計測時間の大幅な短縮の両方を実現することができた。

Table 3 Z+F Imager5010 の主な仕様

スキャニング部	
測定方式	タイム・オブ・フライト方式
測定距離	187.3m
スキャンスピード	1,016,000点/秒
測定範囲	320°（鉛直）、360°（水平）
外観	
寸法	286(D) X 170(W) X 395(H) mm
質量	9.8kg
電源部	
作業時間	2.5時間

Table 4 2 種の計測時間の比較

		Z+F Imager 5010 (Z+F)						
		換算計測密度	低品質	標準品質	高品質	最高品質	解像度 (pixel/360°)	
GLS-1500 (TOPCON)		0.068cm	3分 28秒	13分 28秒	26分 56秒	53分 20秒	40,000	
計測密度	0.6cm	0.154cm	1分 44秒	6分 44秒	13分 28秒	26分 56秒	20,000	
	1.0cm	0.31cm	52秒	3分 22秒	6分 44秒	13分 28秒	10,000	
	2.0cm	0.62cm	26秒	1分 44秒	3分 22秒	6分 44秒	5,000	
	5.0cm	1.23cm			52秒	1分 44秒	2,500	
	10.0cm	2.44cm			26秒		1,250	

2.2 デジタイザ

デジタイザは、三角法方式で計測している。三角法方式とは、三角形の辺の長さや角の大きさの関係を利用して計測する方式である。0.1mm 以下の高い計測精度をもつが、計測範囲は 0.1~2m の狭い範囲に限られるため、この方式のデジタイザは比較的小さな対象物の計測に使用される。今年度の調査においてもデジタイザは、昨年同様 Konica Minolta 社製 Range5 を使用し、壁面表面の漆喰むらや描写のタッチによる微妙な凹凸を計測することにした。

3. 結果

教会堂内の空間記録としては、3 か所すべてにおいて Imager5010 を使用して 3 次元計測を行った。近年発見されたヴェスティータ家の教会は、現在の環境では建物の地下に位置し、教会の外観は後世に建設された建物で取り囲まれていて、外からの構造認識は無意味なので、外観を含む外からのスキャニングは行わなかった。しかし、グラヴィーナ・ディ・リッジョ東教会では、同教会以外にも掘られた洞窟が隣接して周辺に多く

存在していたため、教会の外側から東側にある洞窟内部まで範囲を広げてスキャンした。また、パラジャネッロのサン・ニコラ教会は峡谷の斜面（河岸段丘）にその入口があるが、入口周辺は崩落して土砂などがさらに堆積したため、入口への当時の階段はまったく見えない。しかし、河岸段丘の段差レベルで周辺をスキャンすれば、崩落前の教会入口周辺の状況が見えてくるのではないかと推測し、教会の外周辺についても広く地表面を計測記録した。

Range5での壁面スキャンも、上記の3教会すべてで行った。グラヴィーナ・ディ・リッジョ東教会のほとんどの壁画は（時代とともに複数回の塗り重ねがあり）2〜3層の構造になっている。この重層ないしは積層構造の壁画を記録するため、東側の2つの後陣に描かれた、とくに「聖母マリア」の描かれた右側の後陣についてはスキャンとともに、原寸大模写をも行った。さらに、右側壁にはポンタータ法で制作したらしい形跡（漆喰を塗り継いだ鋸跡）が斜光線調査で発見され、直線を引くために用いられた墨縄の跡も残っていることから、その部分についてもスキャンを行った。

2008年に発見されたばかりのヴェスティータ家の教会の壁画では、左壁龕に描かれた聖ニコラウスの顎髭や口元、頭髪あたりに微妙な陰影効果を出すために鋭利な道具で刻された線刻（インチジオーネ）や、絵具を盛り上げて立体的な模様に仕上げた描写箇所が斜光線調査で発見できたので、左壁龕全体をスキャンすることにした。

パラジャネッロのサン・ニコラ教会では、南側の壁面に描かれていた「玉座のキリスト」はほとんど消失しまっているが、その枠線部分（左上）に墨縄を用いた縄目跡を見ることができた。また、東側の後陣に描かれている「デエシス」には粘性の異なる2種類の石灰クリームを描写の前に塗ったと思われる痕跡が、斜光線の照射なしでもはっきりと確認できた。「デエシス」の（向かって）右側に描かれている「聖ニコラウス」の足下あたりには、やわらかい（粘性の低い）石灰クリームを使用したらしく、白い筋跡が何本も下方に流れ落ちている。一方、「デエシス」の（向かって）左側に描かれている「聖母マリア」の足下あたりには、やや硬め（粘性の高い）の石灰クリームを塗ったらしく、壁面に手指でのばした跡がくっきりと残されていた。この描画層の下に塗られた石灰クリームは、中世の壁画技法を実験的に検討していく上で重要なマテリアルであると判断されたため、そうした今後の研究に資する基本情報として壁面のスキャンを行った。

#### 4. 計測データの利用

計測したスキャンデータはデジタル・アーカイブとして記録するだけでなく、コンピュータ処理の仕方でも（アナログデータでは考えられないような）有用な研究資料として利用することがわかった。今回の調査で使用したImager5010は、きわめて小さい密度で計測することができたため、たとえば教会の平面図を希望する垂直位置でスライスし、その断面を平面図とすることで、図面作成の精度と自由度が飛躍的に上がった（Fig.1-3）。その「自由度」を逆に言えば、3Dスキャンデータを

スライスする高さによっては、壁面に設けられた大小の壁龕や祭壇の窪みなど左右されるので、平面図の輪郭は《スライスする高さ》によってずいぶん変わってくるので、平面図には必ずスライス位置を明記する必要があるだろう。また、壁面そのものも地面に対してすべて垂直であるとは限らないので、《スライスする高さ》によって教会の大きさや壁面の形状が変わってくることも了解していなければならない。

その他、3Dスキャンデータの利用法としては本報告書の第1-3で実例を紹介したように、スキャンしたデータは加工し、3Dプリンタを利用して容易に立体模型を作成することができる。

3次元スキャナを導入することで、まったく新しい地平の空間記録法が実現することとなった。つまり、詳細な3次元データを（労せずして）容易に取得することが可能になったわけである。その情報量はグラヴィーナ・ディ・リッジョ東教会では、13地点で計測をした結果、約30億点の位置座標データで17.1GBであり、ヴェスティータ家の教会では約17億点で10.9GB、サン・ニコラ教会では約23億点で21.9GBである。このような時代が到来した現在、取得した膨大な情報量の3次元データを十分に活用する、新たな研究方法を工夫していくことも今後の課題の1つであると思っている。

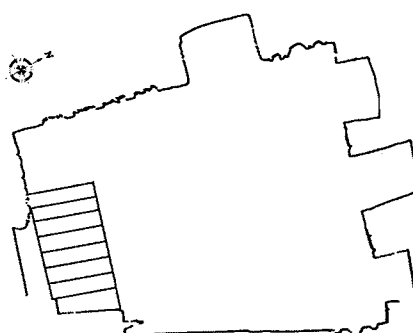


Fig.1 スキャンデータから作成した  
ヴェスティータ家の教会



Fig.2 スキャンデータから作成した  
グラヴィーナ・ディ・リッジョ東教会



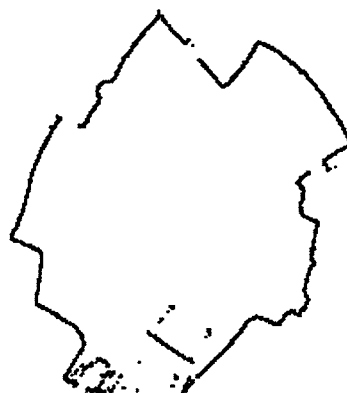
**Fig.3a** サン・ニコラ教会の平面図  
(後陣祭壇上部から 1.0m 下でスライス)



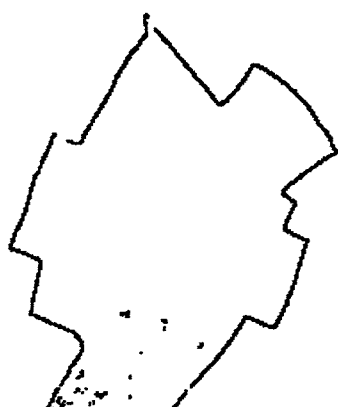
**Fig.3b** サン・ニコラ教会の平面図  
(後陣祭壇上部から 0.5m 下でスライス)



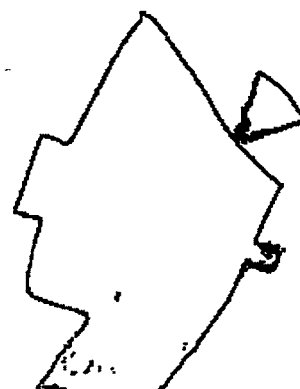
**Fig.3c** サン・ニコラ教会の平面図  
(後陣祭壇上部でスライス)



**Fig.3d** サン・ニコラ教会の平面図  
(後陣祭壇上部から 0.5m 上でスライス)



**Fig.3e** サン・ニコラ教会の平面図  
(後陣祭壇上部から 1.0m 上でスライス)



**Fig.3f** サン・ニコラ教会の平面図  
(後陣祭壇上部から 1.5m 上でスライス)



パラジャネッロのサン・ニコラ教会における 3 次元空間計測



正面後陣壁面から右側壁までの 3 次元データ(全点数の内 4 分の 1 を表示)



同位置での 3 次元データ(各点に色を付加)



# 壁画面の見え方の違い

## 散乱光

LEDライトを壁面の正面から照射し、  
光ムラをなくして撮影

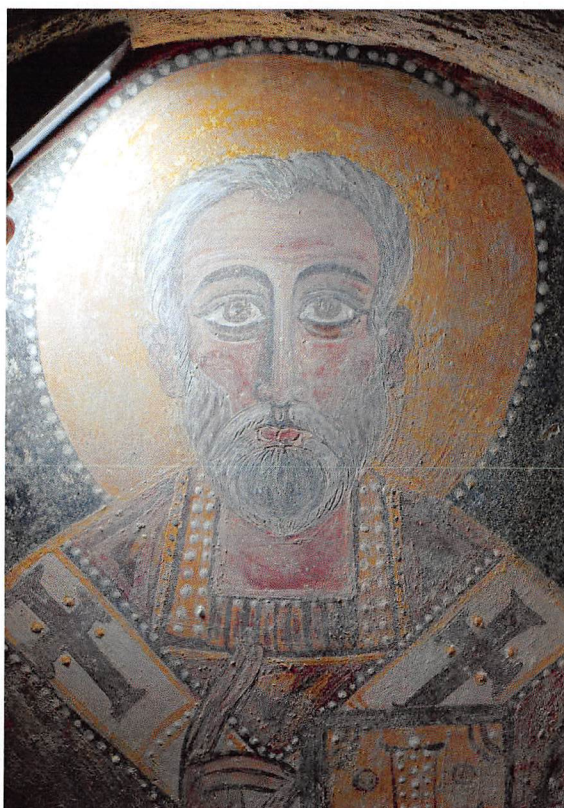


画集などでよく目にする一般的な記録方法

- 色の再現性を重視
- ✕ 壁面の微妙な凹凸に気づきにくい

## 斜光

光を浅い角度で斜めに照射し、  
陰影によって強調された壁面の凹凸を撮影



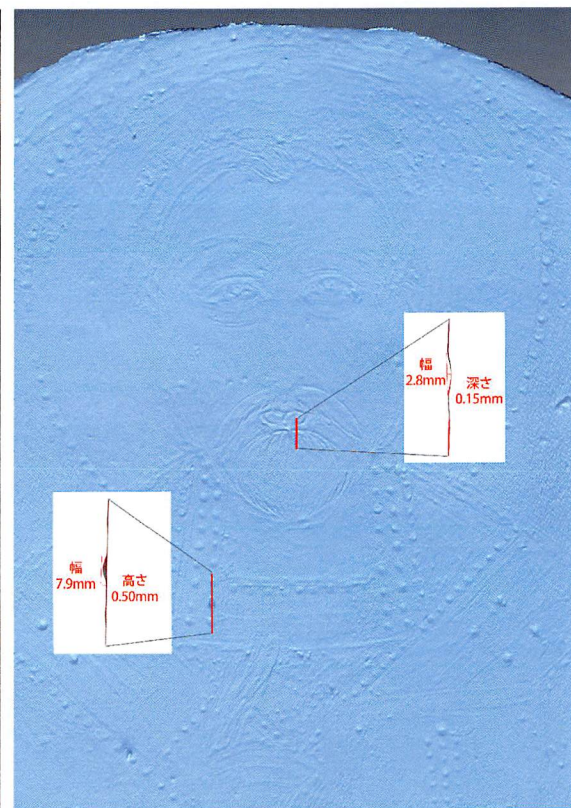
もっとも手軽で効果的な技法観察・記録方法

- タッチ(筆跡)やインチジョーネ(刻線)が明瞭
- ✕ 凹凸を定量的に記録できない

グロッタリーエで2008年に発見された教会  
左側の壁龕に描かれた「聖ニコラウス」

## レーザー光スキャン

3次元空間での点の位置をミクロン単位で計測し、  
表面の凹凸をモニター上に再現



連続的かつ定量的な記録方法

- 非破壊・非接触で高精細に壁画表面を分析
- ✕ 色情報の同時取得ができない