

# 三次元壁画空間スキャンニングのための装置開発

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

## Equipment Development for 3-Dimensional Space Scanning

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

The 3-Dimensional space scanning has an important part in our project from the view point of accurate record of current condition of cultural heritage. For a smooth scan under any other difficult condition, we developed and designed original platform for GLS-1500 laser scanner with Kanazawa university technical support center. In this chapter, we will introduce its functions and other devices for safety against overturning.

**Key Words:** 3D laser scanner, platform, rotate and settle, safety against overturning, scan efficiency

**キーワード:** 三次元レーザースキャナ, 雲台, 回転・固定, 転倒防止, 計測の効率化

### 1. はじめに

近年, パソコンをはじめ携帯電話, カメラ, テレビなど日常的に利用する生活ツールのデジタル化が急速に進んでいるというより, 世界はオールデジタル世界に脱皮しつつあると言えるであろう。これは単なる生活の利便性向上などというレベルではなく, グーテンベルクによる活版印刷の発明が誘起した近代メディア革命に継ぐ第2次メディア革命に匹敵する。現在では, 3次元空間を知覚する人間の視覚に限りなく近い表現が可能となり, すべての「みる(視る, 見る, 観る, 診る)」場面でデジタル技術の活用が求められている。その中で, 3次元での立体・空間計測は, 建築・土木の分野で建造物や敷地の現状を記録する場面, 品質管理やリバーエンジニアリングの分野で製品をスキャンする場面など, 応用範囲は日増しに拡大している。私たちが取り組む南イタリア中世壁画群診断調査プロジェクトにおいても, 壁画は建築空間の一部である壁に描かれているわけだから, 3次元で壁画空間をスキャンすることは, まずは現状を精確に記録することが最重要な文化財保存の使命である基盤データづくりそのものであり, すべての記録をデジタル化して集積・保存するデジタル・アーカイブの形成にとっては不可欠な作業であると言える。

3Dレーザースキャナは, 大きな対象物もスキャンが可能であること, 広範囲な空間でも詳細に記録できること, 人が容

易に近づけない危険な構造物もすばやく計測できること, もちろんレーザー光線は対象物にいかなるダメージも与えずに(非破壊)計測でき, 計測後すぐに結果が得られるばかりか結果を可視化できるなどの利点がある。今回の調査では TOPCON 社製 3Dレーザースキャナ GLS-1500 を用いて, 3次元での壁画空間スキャンニングを行った。しかし, 2010年に行った予備調査から, 洞窟教会は自動車で行くことのできないロケーションにあり, バッテリーを含む必要な機材はすべて各自が分担して抱えて長距離を歩かなければならないこと, 洞窟内の壁画空間がかなり狭隘なことなど, 何かと不都合の多い調査が予想された。そのため, 事前に機器の部分的改良や運搬の手段, 設置や機能的な計測方法などについて, 特殊な調査地の状況を十分に考慮した工夫をしておくことが必要であった。

本章では, その中でも調査機器 GLS-1500 の付属品として私たちが本学の技術支援センターの協力を得て, 開発・設計した新型の自由回転雲台と転倒防止用の器具について説明する。

### 2. 従来の計測方法

一般に GLS-1500 は, 道路舗装面の凹凸や大型建造物の計測によるメンテナンス管理, 河川・ダムなどの計測による災害調査, 建築物の保存・修復・改築のための図面作成などの目的で設計されたものであり, 実際にもそのように使用されている。また, GLS-1500 は 150m 離れた地点からの計測で, 誤差が 4mm 以内という仕様スペック (Table 1) から, 本機は明らかに短・中距離用の 3Dレーザースキャナである。

計測範囲は, 本体の上部が水平方向に回転することで, 360° どの方向の計測も可能であるが, 垂直方向では, 取り付けられた鏡に反射するレーザー光によって計測を行うため, ごく限定された角度 (水平方向を 0° とした場合, 上下に各 35°) しか

\*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

測定することができないデメリットがある。そのため、本体を既成の三脚に取り付け、高さ 3m の洞窟内を計測しようとした場合、上下方向ともに直径約 4.3m のデータが取得できないことになる (Fig. 1)。このことは逆に 4.3m 水平方向に移動できれば計測が可能ということになるが、狭隘な洞窟内では十分な移動距離を確保することができず、洞窟空間全域を完全にカバーすることが難しい。そこで、傾斜台などで本体を傾けるなどの工夫をして計測する必要がある。TOPCON 社では、オプションとして傾斜台を販売しているが、高額であり、また鉛直方向に 15° 刻みでしか傾斜できない。こうした状況から、TOPCON 社製 GLS-1500 を狭隘な洞窟教会という特殊なフィールドで有効かつ機能的に使用するために、本学の技術支援センターに協力をお願いして、無段階で自由回転が可能な新型雲台の設計開発を行うことにした。

Table 1 GLS-1500 の主な仕様

単発測定精度	
距離精度	4mm ( $\sigma$ ) / 1~150m
角度精度	6"
スキャン分解能	
計測密度	最大 1mm / 20m
最大測点数	V x H : 100,000,000 点
測定範囲	
鉛直	$\pm 35^\circ$ (最大)
水平	360° (最大)
カメラ部	
画角	約 22° (V) X 16.5° (H)
画素数	2メガピクセル (1600 X 1200)
外観	
寸法	299(D) X 240(W) X 566(H) mm
機械高	410mm (基盤取付け面からミラー回転中心まで)
質量	16kg (バッテリー、基盤除く)

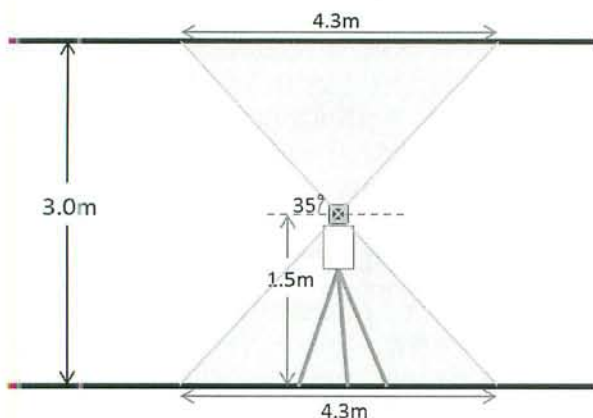


Fig. 1 従来の方法による計測範囲

### 3. 新たな雲台の設計とその特徴

実際に計測を行うまでには、現場での三脚設置、三脚への GLS-1500 本体の取り付け、本体ウォームアップ (初期安定動

作) など、予想以上に長い待ち時間がかかる。洞窟教会内は決してシンプルな空間ではなく、列柱や仕切り壁などの障害物が多い複雑な空間となっている。こうした現場をスキャンする場合、三脚の位置を変えて複数箇所での計測を行う必要があるため、雑多な準備作業で計測以外にも多くの時間を割かれてしまうことになる。さらに、GLS-1500 が性能上の限界から測定できない上部 (天井部) と下部 (床面) 計測のためにスキャニング位置を移動していたのでは、非常に作業効率が悪い。また、GLS-1500 本体と壁面の間に障害物があると、正確にその距離を測定することができないため、スキャニングの間は誰も洞窟教会内にいることが許されない。ということは、3D スキャニング班が調査現場を長時間にわたって独占することになり、他の調査班だけでなく、壁画見学に訪れる外部の者にも迷惑をかけることになる。そこで、新たに考案する雲台の設計コンセプトとしては、スキャニングの位置変更回数の減少と感覚的に角度を調整できる操作性の利便性を重視した。具体的には、GLS-1500 本体を水平方向に 360°、鉛直方向に 90° までを無段階で回転・固定できるものにした (Fig. 2)。

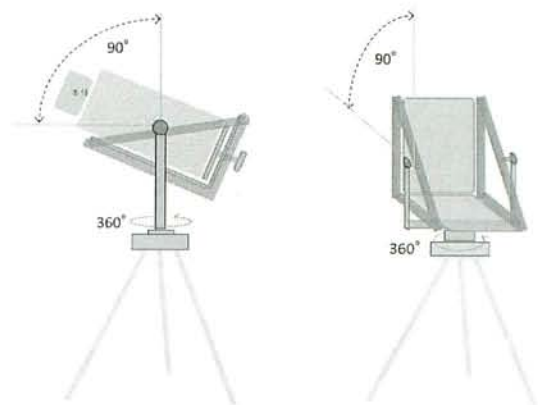


Fig. 2 新しい雲台の概念図

### 4. 転倒防止のための工夫

GLS-1500 本体の重量は 16kg 以上あり、本体を傾けると重心がずれてバランスを崩し、転倒してしまう危険性がある。また、本体を傾けたことにより重心が上に移動するので不安定になり、少しの振動でも倒れる危険性があった。そこで、かなりの凹凸がある洞窟内の床面に三脚を立てることを想定し、以下のような 3 つの転倒防止策 (工夫) を講じることとした。

#### 4.1 フレームの装着

雲台と本体は 3 ヶ所 (上部 2 ヶ所、下部 1 ヶ所) で固定するが、指定した角度で固定するためには本体中央に取り付けた 2 つのネジを使用している。計測中は本体上部 (ヘッド) が回転、同時に内部の鏡 (ミラー) も作動するので、本体は常に微振動しているのが普通である。2 つのネジでも十分に固定できているとは思えないので、作動中の微振動と本体の重量を考慮し、本体と雲台を弓形フレームで新たに 2 ヶ所固定 (Fig. 3) し、中央部のネジが緩んでも転倒しないように工夫した。



Fig. 3 弓型のフレームで  
90° 傾けた状態で固定された本体

#### 4.2 おもりの吊り下げ

本体下部にバッテリー、センサー、電子基盤などの主要装置が組み込まれているため、全体の重心は本体の中心より、やや下方にある。GLS-1500 を傾けると、本体の真下にあった重心の位置が外側にずれ、重心の高さも上がる。したがって、三脚に固定する際に本体を傾斜させた場合、重心のある方向に倒れてしまう可能性がある。そこで、重心の位置を下げるために、三脚の開脚部中央におもりを吊り下げることにした。三脚のヘッド部分には本体取り付け用基盤を固定するためのネジがあり、そこには下げふりを吊り下げるための小さい穴が開いている。ただ、この穴を利用して数 100g 程度の下げ振りを吊るすことはできるが、重心を下げるために必要な数 kg のおもりを吊るせるほどの耐久性はない。そこで、本体と三脚を固定するネジを取り外したあとのねじ穴を利用し、そこに雲台もいっしょに固定できる固定ネジを新たに設計して取り付けることとした。このフックに重い石などを入れた袋を吊り下げることで重心を下げ、本体のいっそうの安定を図った (Fig. 4)。



Fig. 4 三脚の真下に吊り下げられたおもり

#### 4.3 三脚の固定

調査地によっては、三脚を立てる地面が固いために、本体を安定させるために三脚の先端 (石突) を深く地面に突きさすことができない場合がある。さらに、地面の凹凸がなく平滑なために三脚の脚 (石突) がすべらないように固定することが難しい場合もある。どのような床面の場合でも本体を安定させて計測できるように、三脚の脚を固定する簡便な器具を作製した。作製には、Oリング1つと長さ約 40cm のチェーン3本、2ヶ所の穴が開いた鉄板3枚を用いた。各チェーンの一方の先端をOリングにつなぎ、もう一方の先端を (2つの穴の開いた) 小さな鉄板につなぎ、鉄板に開けた穴に三脚の先端 (石突) をそれぞれ差し込むと、Oリングを中心に3本のチェーンをピンと張ることができる。この器具を使うと、三脚底辺の開脚部がつくる正三角形は固定され、三脚の脚の1本が勝手に地表をすべって広がることを防止することができる (Fig. 5)。

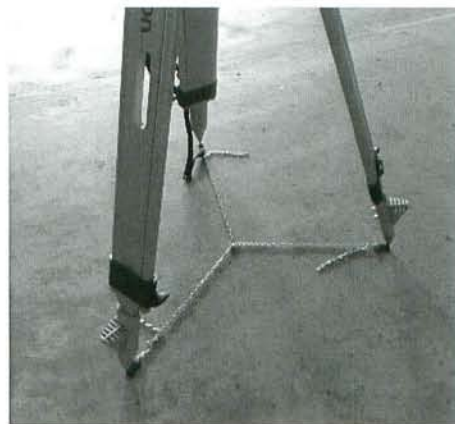


Fig. 5 三脚が広がるのを防ぐためのチェーン

## 5. 結果

今回の調査では、サン・ヴィート・ヴェッキオ教会 (元の場所) の外壁・内壁、博物館内に移築された同教会の内壁、パードゥレ・エテルノ教会の内壁、サン・ミケーレ・デッレ・グロッテ教会の外壁の5ヶ所の3次元スキャニングを行った。

Table 2 は、壁面まで 5m の距離で、水平方向に 360°、鉛直方向に ±35° スキャニングした時の、計測密度と時間を示したものである。計測密度が大きいほど、計測に時間がかかることがわかる。文化財保存のためのデジタル・アーカイブ形成においては、このスキャニングしたデータに、別に撮影された高精細写真を後で貼り付けることになる。異なる形式 (3D, 2D) のデータを統合する際、位置合わせを行わなければならないが、より正確な位置合わせをするためには、多くのデータが必要である。しかし、調査期間が限られており、計測時間をできるだけ短くしなければならないことから、計測密度を調整する必要があった。計測の際、3次元スキャニングにより、壁面空間を XYZ で表された点群の情報として得るだけでなく、GLS-1500 搭載のデジタルカメラで計測範囲をカラー写真で記録することで、それぞれの点の位置情報に RGB の色情報を付加すること

ができる。このことを利用して、ある程度の計測密度でも正確な位置合わせが可能となり、時間を短縮することができた。理想的には計測密度を6mmに設定したいところを、実際には2cmに設定し、時間を3分の1に短縮した。

**Table 2** 計測密度と時間の関係  
(壁面まで5mの距離で、水平方向に360°、鉛直方向に±35° スキャニングした場合)

計測密度	スキャニング	画像
0.6cm	1時間 5分 5秒	5分38秒
1.0cm	40分 53秒	
2.0cm	21分 50秒	
5.0cm	9分 35秒	
10.0cm	5分 12秒	

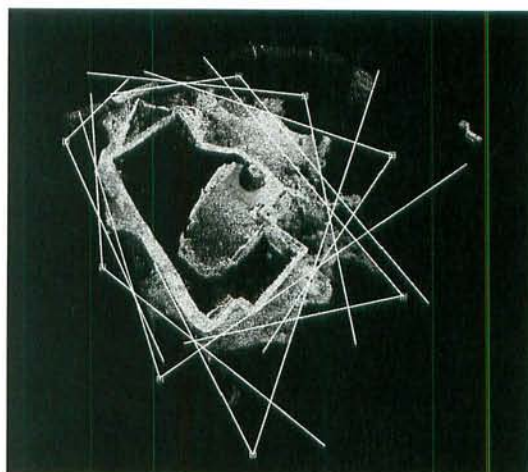
### 5.1 サン・ヴィート・ヴェッキオ教会（元の場所）の外壁

墓地に隣接するサン・ヴィート・ヴェッキオ教会は農園の中にあつて、一部崩れているところはあるが、その周囲は凝灰岩ブロックの塀で囲まれている。閉ざされた空間と違い、外壁をすべてスキャニングするためには、スキャニングする地点を少しずつ移動し、それぞれの地点で計測したデータの位置合わせをしなければならない。位置合わせを少しでも簡便化するために、あらかじめ合わせる位置の壁面に専用の「ターゲット」を貼り、その位置を目印にして異なる地点で得たスキャニングデータを合わせることにした。なお、2つの異なる地点でスキャニングしたデータを合わせるには、最低でも3つのターゲットが必要であり、より正確に合わせるには、さらに多くのターゲットを必要とする。ここでは、教会の外壁面と周囲の塀に合計36枚ものターゲットを貼り (Fig.6) 、位置合わせを行った。

教会の外壁は最高で約6mあるため、GLS-1500本体を直接三脚に固定した場合、約6.4m壁面から離れて測定しなければならない。教会正面後方では、塀が外壁の近くまで迫っており、その幅は約3m程しかないが、後方部左右から斜めに測定する (Fig.7) ことで、雲台による角度調整を行うことなくスキャンすることができた。その結果、10回のスキャン地点の変更で、周囲約56mの外壁すべてをスキャンした。その内1回は内壁との位置合わせを行うため、内壁に貼られたターゲットが見える教会の出入口正面で計測、一方、屋根にあたる教会上部については、周囲にそれより高い場所がないこと、重たい機器を抱えて上部に登るのは危険なことから断念せざるを得なかった。



**Fig. 6** 壁面に貼られた位置合わせ用ターゲットシール



**Fig. 7** 外壁の平面図と三脚の位置  
(サン・ヴィート・ヴェッキオ教会（元の場所）)

### 5.2 サン・ヴィート・ヴェッキオ教会（元の場所）の内壁

教会の内壁は、一見単純な空間に見えるが、上部に崩落の穴が開いていたり、補強のためかブロック状の石を積んだ仕切り壁があったり、複数の小さな窓があったりで、結局は4回のスキャニングが必要であった。そのうち1回は、上部の穴をスキャニングするため、穴の真下に三脚を設置して本体を90°傾けて測定した。結局、三脚の移動は3回のみで全空間を網羅することができたことになる。ターゲットは空間内に22枚を貼り、とくに外壁と内壁のデータで位置合わせができるように、正面入口から見える後方壁面に7枚のターゲットを貼った。

### 5.3 サン・ヴィート・ヴェッキオ教会（博物館内）の内壁

サン・ヴィート・ヴェッキオ教会の壁画が移築されている博物館内には、元の教会と同じ建築空間が再現されている。壁画を剥がさず、壁をブロックごと切り出して移築したため壁画の保存状態はきわめて良好に見えた。壁画を傷めないためにもターゲットを壁画面に直接貼ることは避け、壁画の描かれていない壁面にターゲットを貼ることとした。元の場所とほぼ同様の空間ではあるが、内壁のほとんど全面に壁画があるため、後の作業である高精細写真の貼り付けは慎重に行わなければならない。LEDライトを設置して光の当たる部分を重点的に測定することとした。また、スキャニングの計測密度を変えずに、三脚設置位置や計測方向を変えることで、測定点数とカラー情報を多く取得した。ここでは、新開発の雲台を利用することで、2回の三脚設置位置の変更、5回の計測で空間全体をスキャンした。なお、展示室内の床面は平らで凹凸が少なかったため、横滑りの危険を防止する意味で、上述のチェーンで三脚の脚部を固定した。

### 5.4 パードゥレ・エテルノ教会の内壁

パードゥレ・エテルノ教会は、グラヴィーナ峡谷を挟んで旧市街地の反対側に広がる凝灰岩大地に位置しており、自動車を降りてから足場の悪いところを約150m歩かなければならない。

キャリングケースに GLS-1500 本体を納めると付属品を含めて約 30kg になり、自然の荒地地ではケース底部に付いている小型のキャスターもまったく役に立たなかったため、ケースから出してパーツごとに手で抱えて運ぶことにした。とくに 16kg もある本体は、赤ん坊を抱くための背負子に納めて固定し、胸に抱えるようにして運んだ (Fig.8)。

教会内部のスキヤニングにおいては、3 連アーチを支えている 2 本の柱の跡、後陣部分に穿たれた 2 つの窪み、床面には墓穴であったと思われる複数の穴があり、三脚の位置を自由に設定できる状況ではなかったが、本体を傾斜しての計測 4 回を含む 4 回の位置移動での計測で、合計 6 回で全面をスキヤンすることができた。



Fig.8 TOPCON 本体移動の様子

### 5.5 サン・ミケーレ・デッレ・グロッテ教会の外壁

サン・ミケーレ・デッレ・グロッテ教会はフォンドヴィーゴ地区を流れる急流によって掘られた深い峡谷の断崖にあり、なかなか近づくことのできない自然洞窟をさらに掘削して建設した教会である。天然洞窟だけに外壁の形状は複雑で、近くからのスキヤニングは困難であった。そこで、約 500m 離れた橋を渡り、峡谷の対岸からスキヤニングすることにした。断崖に開けられた多くの穴と複雑に入り組んだ地形のため、教会の外壁全体を詳細にスキヤニングするには、あらゆる角度からの計測の必要があった。しかし、約 150m 離れた対岸からだけでは異なる方向からスキヤニングすることは難しく、今回は 1ヶ所のみからとなった。

## 6. 壁画空間スキヤニングの新たな可能性

前述したように、レーザースキャナによる 3 次元の壁画空間計測は、南イタリアの散在する中世洞窟壁画群の調査・診断情報を記録し、デジタル・アーカイブを形成する基盤づくりの目的で行われた。しかし、単に空間を記録するためだけではなく、今回の調査から生まれた様々な仮説を検証するための資料としても有効に活用できる可能性が出てきた。

### 6.1 16 世紀に行われた移築技術の推定

サン・ヴィート・ヴェッキオ教会は 1956 年に国によって買い取られ、翌 1957 年にはローマの中央修復研究所が壁画をマッセッロ法で壁ごと切断して博物館内に移動した。Fig.9 は、スキヤニングデータを合成したもので、外側から順にサン・ヴィート・ヴェッキオ教会の外壁、内壁、移築された博物館内の内壁面を平面図に表している。(壁画を剥がす前の) 元の場所と博物館内の内壁の 2 つのスキヤンデータを合成することで、壁画を切り取って移築するのに、壁のどの部分をどのくらい削っているのかを知ることができる。博物館学芸員の解説によると、元の教会は、長い年月の間に出入り口や崩落した天井の穴から土砂が侵入して、移築当時よりも地上レベルが高くなっているらしい。そのため、どの点を異なる 2 つのデータの基準とするか、今後も検討が必要である。今回の位置合わせでは、正面出入口の上、左右にある窓の下部中央を同一地点としている。その結果、元の教会の高さ 140cm の位置で水平方向にスライスした場合、博物館に移築後の後陣部分では最大約 130cm、左側壁では約 90cm、右側壁側では 70cm もの差が見られた。後陣の曲面部分では厚く切り取られていること、左側面は後陣から入口に向かってだんだんと切り出す厚みが薄くなっていること、逆に右側面は、入口から後陣に向かって厚みが薄くなり、中程でいったん厚くなるものの、また徐々に薄くなっていることがわかる。また、後陣と右壁面の境界あたりの上部に崩落した穴が開いていること、左壁面と仕切り壁のあたりにも上部に穴のあいた跡がある。マッセッロ法による壁画の切り出し手順との関連があった可能性も否定できない。少なくとも、自然に崩落した穴を利用して、そこからまず最初の壁画を切り出したということは十分に考えられるだろう。元の教会の内壁面に刻まれた壁画切り出しの鑿跡と、計測したスキヤンデータからの移築手順の考察については、II-5 章を参照。

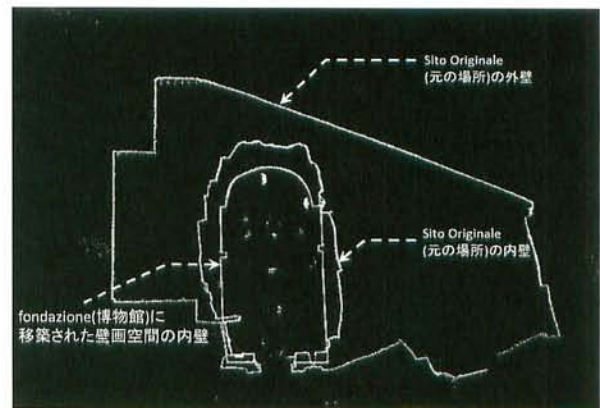


Fig.9 高さ 140cm の位置で水平方向にスライスした時のサン・ヴィート・ヴェッキオ教会平面図

### 6.2 教会建設当初 (12 世紀頃) の凝灰岩台地を CG で再現

かつては一帯に広がっていた凝灰岩台地を掘削して建設された洞窟教会サン・ヴィート・ヴェッキオ教会だが、時代の流れの中で教会周辺は石切場と化し、膨大な量の凝灰岩ブロックが切り出された結果、現在のように教会部分だけが (低くなった

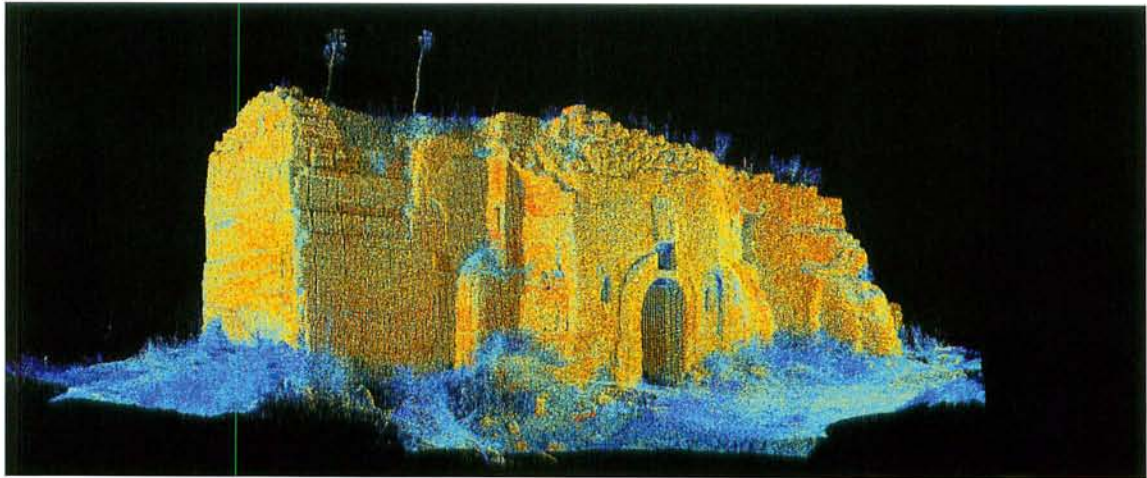
地上に) 取り残される形となった。古い城跡のように見える同教会は、周囲の凝灰岩を切り取られた結果の形状であり、単なる洞窟であった建築当初とはまったく異なった姿となってしまった。そのことは、教会の外壁に等間隔に刻まれた何本ものチェーンソーによる切り出し跡からも読み取ることができる。教会の北側には、市街地へと続く道路、西側と南側には私有地が広がっているため、今では建築当時(12世紀頃)の面影を見ることはできない。しかし、東側約150m先に凝灰岩台地の断崖絶壁が見えることから、建築当時は教会の天井部分とその断崖上部が同じ地表レベルでつながっていたのではないかと考えられた。そこで、その断崖絶壁の形状と高さを教会付近から記録した。今後はCGによって、断崖と教会の上部をつなぎ、建築当時のサン・ヴィート・ヴェッキオ教会一帯の状況を可能な限り再現してみたいと考えている。

## 7. おわりに

今回開発した雲台とそれにともなう転倒防止の工夫によって、狭い洞窟教会内での全面スキャニング、峡谷の対岸という遠距離からの外壁面スキャニングという、性質の異なる2つの3次元空間の測定・記録を当初想定していたよりも正確に、かつ迅速に実施することができた。今回以上にもっと複雑で狭い壁面空間、峡谷の洞窟である調査地まで機材を抱えて歩かねばならないなど、次回はさらに厳しい調査環境が予想される。現地までの機材輸送からデジタル・アーカイブの構築まで、装備の軽量化、データ処理によるスキャニングのシンプル化などに関して、いっそうの工夫を徹底する必要があるにしても、似たようなフィールドで調査を実施する多くの人々が、本報告書を参考に、同様の手段で効率よくデータを取得できればと願っている。

## 謝辞

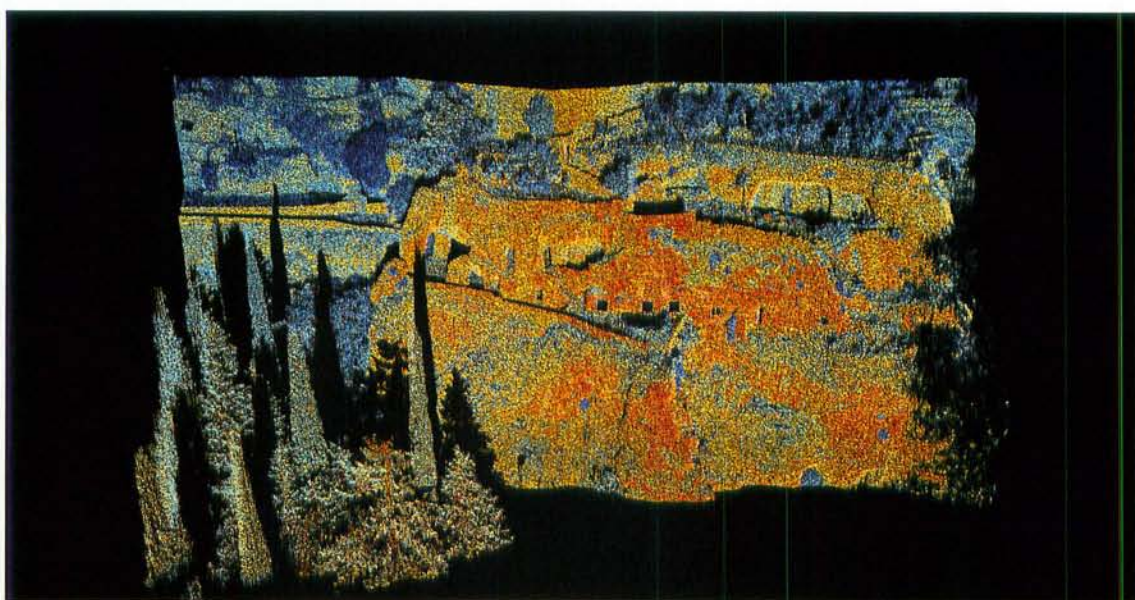
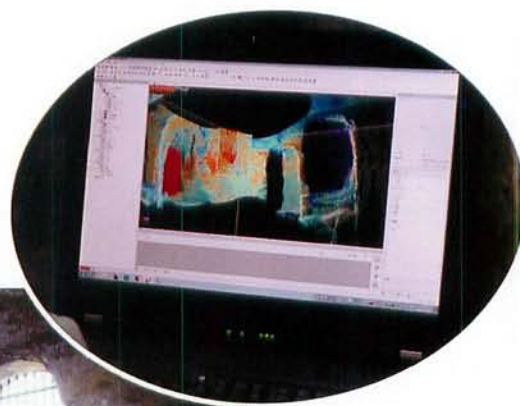
弓形フレーム付き新型雲台の設計・製作に関しては、本学技術支援センターの御協力をいただきました。この新型雲台のお陰で、フィールドでは三脚の位置変更の回数を減らすことができ、また電源スイッチ・オンのままスキャナ本体の方向と角度を、感覚的な操作で自由に行うことができました。ここに感謝の意を表します。



サン・ヴィート・ヴェッキオ教会



パードウレ・エテルノ教会



サンミケーレ・デッレ・グロッテ教会

