

文化財保存における壁画三次元計測の可能性

—国際研究会発表論文要旨—

宮下明珠^{*1}, 宮下孝晴^{*2}

Application of Laser Scanner to the Conservation of Mural Paintings

Mitsumi Miyashita^{*1} and Takaharu Miyashita^{*2}

Research seminar of application and potentiality using the technology of laser scanner was held at Department of Engineering in Genoa University in September 20th, 2011. Because of time limitation for preparation, we presented the possibilities of 3D laser scanner system in our research project on medieval mural paintings in South Italy. In the presentation, we focused on practical use of laser scanner in the cave churches in Gravina in Puglia. We are using two different laser scanners depends on the object we scan: GLS-1500 (TOPCON) for space scanning and Range5 (Konica Minolta) for surface roughness precise scanning. With comparison of the possibilities and traditional measurements, we suggest some applications of laser scanner to the conservation of mural paintings. This is an abstract of our presentation edited for this annual report.

キーワード: レーザースキャナ, 3次元, 壁画, 保存, 表面計測

Key Words: Laser Scanner, 3D, Mural Painting, Conservation, Surface Laser Scan

1. はじめに

3次元レーザースキャナは、広義には対象物の形状を短時間で精密に計測し、その情報を取得するものと定義される。実在す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3次元レーザースキャナは、広義には対象物の形状を短時間で精密に計測し、その3次元情報を取得するものと定義される。実在す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み、解析することが可能となることから、早くから情報処理、医療、美術工芸品や文化財関係の分野で活用研究が進められてきた。近年では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る中、リパースエンジニアリングや検査等にも活用範囲が拡大している。

金沢大学フレスコ壁画研究センターでは、南イタリア中世壁画群診断調査プロジェクトにおいて、2種類の異なる3次元計測機器（レーザースキャナ）を使い分け、最新技術によって科学的に診断調査したデータをデジタル・アーカイブ化しようとしている。とくに建造物の壁面に描かれた壁画を中心とした

文化財保存において、3次元計測機器をどのように活かすことができるか、その可能性を従来の方法と比較しながら提案する。

2. 3次元スキャナの種類

2.1 分類

レーザーを使用する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。

2.2 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。計測精度はおよそ0.1~25mm、計測範囲は35~6000mである。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持つ。これらからレーザースキャナは、建築物や広範囲に及ぶ遺跡など空間の計測に適しているといえる。主なレーザースキャナをTable1に示す。私たちは、この中のGLS-1500 (TOPCON) (Fig.1)を用いて、3次元壁が空間のスキャンを行い、診断・調査結果を組み込んだデジタル・アーカイブの基盤として利用することにした。

*1 フレスコ壁画研究センター

*2 人間社会研究域 歴史言語文化学系

*1 Research Center of Italian Mural Paintings

*2 Institute of Human and Social Sciences,

Faculty of Letters

Table 1 タイム・オブ・フライト方式を採用している
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	
ソニー					
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
レコ					
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
トプコン					
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
トリムレックス					
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
イマージュ					
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
リテック					
ILERIS-3D	7	1200	40	40	タイム・オブ・フライト方式
トプコン					
GLS-1500	4	330	360	70	タイム・オブ・フライト方式



Fig. 1 TOPCON の GLS-1500(右)と計測例(左)

2.3 デジタイザ

一方、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 の範囲に限られているため、この方式は比較的小さな対象物の計測に適していると言える。主なデジタイザを Table 2 に示す。本プロジェクトでは、この中の Konica Minolta 社製 Range5(Fig.2)を使用し、壁画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。



Fig. 2 Konica Minolta の Range5(右)と計測例(左)

Table 2 三角法方式を採用している
主なデジタイザ

製品名	精度 (μ m)	計測距離 (mm)	計測範囲(mm)		方式
			Y方向	X方向	
KonicaMinolta					
Range5	4	450~800	267	334	三角法方式
Range7	8	600~2500	267	334	三角法方式
Vivid9i	8		463	1121	三角法方式
Z corp					
Zscanner600	60	-	-	-	三角法方式
Zacanner700	50	-	-	-	三角法方式
Zscanner800	40	-	-	-	三角法方式
Stenbinchler					
COMETS	50	500	890	660	三角法方式
Gom					
ATOS		450~1200	1000	750	三角法方式
Fritulrobot					
Baces3D	60	100~200	-	-	三角法方式

3. 文化財保存における 3 次元計測データの活用

対象物の形状を 3 次元で計測・保存することは、文化財研究・保存・記録・再現のどれにおいてもきわめて重要な役割を担っている。レーザー機器による計測は非接触かつ非破壊で詳細なデータを取得することが可能なため、いろいろなジャンルで基本的保存データの 1 つとなっている。とくに建築・工学的観点からの重要性は大きく、遺跡や建造物等の空間計測にはレーザースキャナが今や恒常的に威力を発揮している。一方、レーザー機器による計測は当然のことながら、美術・歴史的観点からのニーズも高まりつつあり、仏像や土器などの小型の計測対象にはデジタイザが適しているのだが、その使用例は前者に比べてまだ多いとは言えない現状である。

4. 文化財における従来の 3 次元計測方法

私たちが教会などで目にする壁画の表面には、よく観察すると様々な要因でできた凹凸がある。壁面を間近に見る機会が少なく、画集でも色の再現性を最優先し、正面からのフラットな照明で撮影した写真が多いため、(また、絵は平面であるという先入観も手伝って)画面の微妙な凹凸にはなかなか気づかない。壁画研究分野においても、レーザーによる壁画面の 3 次元計測の例はまだない。以下、壁画あるいは板絵といった「絵画作品」に対する 3 次元計測方法としての斜光線と CT スキャンについて説明する。

4.1 斜光線

Fig.3 は、パドヴァのスクロヴェーニ礼拝堂で撮影した散乱(正常)光と斜光線による壁画(ジョット 1305-10)の写真である。正面から照射した散乱光では、中央の聖人に対しては光ムラがなく、鮮やかな色合いを見ることができる。一方、壁面の右側から浅い角度で光を斜めに照射した場合、壁面にある凹凸が影をつくって誇張されるため、漆喰を盛り上げたストッコの円光に刻まれた放射状の溝や、肌の描写で絵具を塗り重ねた際の筆跡(タッチ)が驚くほどはっきりと、まるで浮き彫りのよう

に見える。このほか、斜光線の照射が浮き上がらせるものは円光盛り上げや筆跡だけでなく、フレスコ画特有のジョルナータと呼ばれる一日ごとの漆喰塗り継ぎの痕跡（範囲）をも明瞭に検出することができる(Fig.4)。この斜光線が浮かび上がらせる壁面の凹凸は、(一般に壁画の描かれている教会堂内は薄暗いので)懐中電灯の光を照射してデジタルカメラで撮影すれば簡単に記録できるため、もっとも手軽で効果的な観察および記録の方法であると言えよう。しかし、礼拝堂などの窓や照明いかんによっては壁画空間が明る過ぎ、調査用に照射した斜光の効果が出ないこともある。また、斜光線調査でもっとも問題となるのは、斜光線で見えている凹凸の程度は光線の照射角度によって変わる影の長さによる感覚的なものであるため、凹凸を定量的に記録することができないという決定的な欠点があることも忘れてはならない。



Fig.3 斜光線(左)と散乱光(右)での見え方の違い
(パドヴァのスクロヴェーニ礼拝堂)

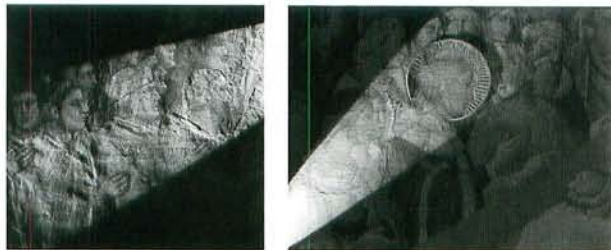


Fig.4 斜光線で誇張された壁面の凹凸
(フィレンツェのサンタ・クロ・チェ教会大礼拝堂)

4.2 CT (Computed Tomography) スキャン

物体の周囲を回転する放射線などの線源とその対角線上に位置する検出器により、物体を透過した放射線量を計測するスキャン法である。物体を放射線が通過する際、その一部は物体内部で吸収されて減衰する。それぞれの方向でどの程度放射線が吸収されたかを記録することで、物体を3次元で計測し、さらにコンピュータ解析によって得られた断面画像を利用して、あらゆる方向からの物体内部の断面構造を調べることができる。このスキャン技術は主に医療の分野で多く利用されているが、近年、美術品や文化財に対しても利用されるようになってきた。イタリアの国立フィレンツェ修復研究所では、昨年、ラファエッロの板絵「大公の聖母」を治療(修復)する前にサン・ジョヴァンニ病院の協力でCTスキャンし、支持体であるポプラ材や絵具層の健康診断(検査)を行っている(Fig.5)。日本でも、たとえば早稲田大学では、X線CTスキャン技術とデジタル画

像処理技術を用いて仏像などの文化財を調査・解析するプロジェクトに取り組んでいる。その中で、文化財の外部・内部の構造を3次元データとしてデジタルアーカイブに蓄積するだけでなく、コンピュータ上で文化財の仮想修復および(年輪による)年代測定技術の開発を進めている。また、九州国立博物館では、昨年、福岡で発見された「庚寅」の銘が刻まれた太刀を分析したり、興福寺の阿修羅像の原型となった塑像の復元などに利用している。現在、日本には文化財専用のCTスキャン装置が2台あり、今後ますます増えていくものと予想される。しかし、壁画調査に関しては、建築物の内壁に直接描かれているため、CTスキャンするとなれば、壁画を装置に入る大きさに切断しなければならず、とても「修復における非破壊主義」を標榜する診断調査には利用できない。

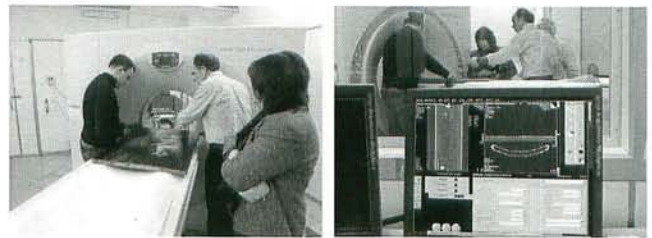


Fig.5 CTによる油絵の診断風景

5. デジタイザによる壁画の3次元計測の新たな可能性

従来では難しかった壁画の3次元計測が、計測技術の発達にともなうデジタイザの出現によって、非接触・非破壊の原則に基づく定量的解析が可能になった。将来は、壁面の凹凸を3次元計測し、高精細レベルで壁画表面を分析することによって、以下の3つのことが可能になると考えられる。

5.1 壁画表面の記録

時間の経過とともに劣化していく文化財に対しては、修復や保存対策を講じる前に、一刻も早い現状記録が必要である。この記録は、仮に現物がなくなってしまうという不幸な事態が生じたとき、原寸大でのレプリカ作成に活用できるし、教育用に複製をつくらうとする場合にも、最新の3Dプリンタを利用して、いくらでもレプリカを量産することが可能である。もちろん、3Dプリンタが生み出すレプリカの素材はABS樹脂に限られるが、形状的には現物(オリジナル)の3DデジタルデータをDNAとしてコピーされたクローンと言えるだろう。また、劣化が激しく、触ることができないものに対しても、コンピュータに計測データをいったん取り込んでしまえば、どの角度であれ、どの断面であれ、思いのままの状態を観察できるため、診断の基礎情報とすることができる。Fig.6は、フィレンツェのサンタ・クロ・チェ教会大礼拝堂右側にジョットが描いた「聖フランチェスコの聖痕拝受」における「円光」を計測したものである。この計測結果から、画集などでは平板な円にしか見えない聖フランチェスコの円光が、実際には半径21cmの円がパラボラアンテナ状に最大1.0cmの高さで形成されていたことがわかった。

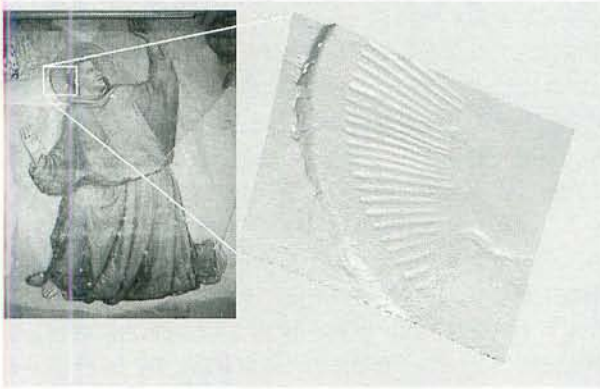


Fig.6 Range5による円光のスキヤニング

5.2 技法の解明

壁画表面の凹凸の中には、ひび割れや剥落などの漆喰壁自体の劣化が原因で生じたもののほかに、漆喰を塗ったときの鏝跡や描写の際の筆跡（タッチ）など、壁画制作の際に生じたものもある。それらを模写などによって得られたサンプルデータと比較するなどして分析研究すれば、（歴史のペールの向こうに遠くかすんでしまった）当時の壁画制作に関わる技法解明が大きく進展するに違いない。絵具の塗り重ねや筆跡（タッチ）のように微妙な（高低差のごく小さい）凹凸こそが、強い輪郭線であったり、様々な色彩を重ねたグラデーションであったり、描画世界におけるミクロの秘密なのである。それは人間の目では判別しにくく、定量的な解析も難しい。計測した3次元データのうち、色情報を除いたXYZの位置情報のみを表示することで、色に惑わされない実際の壁画面の凹凸を見ることができ、さらにアプリケーションのいくつかの機能を使用すれば、定点間の距離はもちろん、凹凸の高さや角度まで簡単に知ることができる。Fig.7は、グラヴィーナ・イン・プーリアで行ったサン・ヴィート・ヴェッキオ教会の後陣右側に描かれている天使像を計測したものである。顔や胸元に剥離跡が見えるほか、（図版上に楕円で囲んである）天使の首部分には筆跡が残っており、高精度で撮影したカラー画像を合わせることで、ボリューム感を出そうとした色の塗り重ね順を分析することができる。

5.3 作者の同定

フレスコ画とは漆喰を壁面に塗り、それが乾くまでの短い時間内に（膠や卵黄などの接着剤を加えない）水だけで溶いた絵具で絵を仕上げなければならない技法である。また、もともと壁画制作の技法として開発されたので教会堂内や礼拝堂内の広い面積の壁面に絵を描く場合が多いことから、美術史では1人の画家の手に帰されている作品でも、実際の制作には1人ではなく同じ工房の弟子や助手のほか、他工房からも画家が協力関与することが普通であった。工房の親方である師から弟子へと受け継がれる技法は、工房によって少しずつ異なるため、壁面の凹凸から読み取れる計測データを駆使すれば、壁画を手がけた画家や工房を特定できる可能性は十分にある。



Fig.7 Range5によって浮かび上がった制作者の筆跡

6. ミクロ単位の分析のための新たな併用装置の開発

フレスコ壁画研究センターでは、非接触3次元デジタイザによる壁画面の3次元計測を行うと同時に、絵具（顔料）の粒状性や色の塗り重ね、さらには個別の筆勢などをミクロン単位で分析・研究するために、顕微鏡の移動撮影装置を開発している。

これは、高さ40cm、幅50cmの四角いジュラルミン製フレームに、デジタル顕微鏡を動かすためのゴムベルトとモータが縦と横に取り付けられた装置(Fig.8)である。また、装置には「記録」と「運転」の2つのモードがあり、記録モードでは20秒間で動かしたデジタル顕微鏡の軌跡曲線を、ゴムベルトと連動している距離センサが読み取って、それをXY座標系での位置移動に変換する。運転モードでは、設定した3段階のスピードの中から選択し再生することで、記録した軌跡曲線を一定速度で動かすことができる。この移動撮影装置によって、高倍率のために撮影範囲が狭かったデジタル顕微鏡の画像（画角フレーム）が、調査したい描写に沿って線的に連続記録することが可能になった。静止画像からは伝わってこない、あるいは読み取れない画家の筆勢が動画によって明らかとなるなど、今後はその効果的利用について実験を重ねるつもりである。



Fig.8 Range5による円光のスキヤニング