

考古資料のデジタル記録化とデータ活用

白 杵 勲・正 司 哲 朗

要 旨

デジタル技術の進歩と普及は、考古学・文化財関連の記録作成にも大きな変化をもたらしている。特に、事物を三次元的に記録する技術・機器、デジタルカメラを用いた高度撮影は普及が進みつつあり、より簡便で効果的な記録作製や、記録の公開・活用の目的と方法の検討が必要とされている。そこで本稿では、レーザースキャンによる三次元計測とデジタルビデオを用いた高精細画像の空中撮影方法について検討した。その結果、レーザ計測は土器等の形状・技法の記録・提示に有効であることを確認し、さらに画像処理を用いて簡便な撮影機器による高精細画像の製作方法を開発した。

1. はじめに

近年のデジタル技術の進歩と普及は、考古資料や博物館所蔵資料の記録・管理作業にも大きな影響を与えている。例えば、デジタルカメラの普及は、現像・焼付けなどの過程を省き、フィルムの保管も必要としないため、映像記録の作成や管理・検索は大幅に簡便化した。また、デジタルカメラを利用した写真測量技術は、従来のような特殊なステレオカメラを必要とせず、携帯電話のカメラでも測量が可能なものとなっている。

資料の記録には、実測図や写真のような平面（二次元）的な記録のみではなく、事物を立体として記録する三次元データも用いられるようになってきた（門林 2010）。特に、計測機器の低価格化と小型化により入手も比較的容易になり、小型の遺物であれば立体的な記録を作成することも困難ではなくなってきた。パソコンの高機能化、記録を保管する媒体の大容量化と低価格により、高精細画像や動画の作成・保管・閲覧なども簡便化が進んでいる。

このようなデジタル技術の進歩により、図面や報告書などにも紙媒体以外のものが用いられるようになってきた。学術雑誌の中にも、印刷物とせずweb等で公開するものが現れている。考古学において主流であった印刷物による調査報告書にも、電子媒体を併用する例が増えている。

このような状況は、これまで図や写真を中心に公表されてきた考古資料や博物館資料について、新たな形での公開が可能になってきたことを示している。現状では、従来の報告書の体裁（文章・

図・写真)をデジタルデータとして添付する程度にとどまる場合が多いが、3D動画やCADデータのように、従来では不可能であった形での公開や活用を今後志向していく必要がある。考古資料・文化財のデジタル的な計測法は、機器やコストの問題から、まだ一般的なものとはなっていないが、近年の機器の低価格化により応用の事例が増加してきた。金田明大らは、このような問題意識から、三次元計測に関する提言を積極的に行っている(金田他 2010など)。本論でも、金田らの提言を受けて、考古資料のデジタル計測と、得られたデータの活用について考察を進めていきたい。なお、本稿は白杵・正司の共同作業の成果であるが、第1～3章については白杵が、第4章については正司が主に担当した。

本研究は平成23年度札幌学院大学研究促進奨励金「三次元測定による考古・博物館資料の資料化の研究」(課題番号 SGU-G11-202002-11)による成果の一部である。

2. 実測図・写真とデジタル計測

(1) 実測図・写真の特徴

デジタル画像・3Dスキャン等のデジタル計測と従来の実測図や写真とはどのような差があり、どのような長所・短所があるのかを明らかにしておくことは、計測データの新たな活用法を考える上で不可欠である。

実測図とは、遺構や土器・石器などの立体物を方眼紙等の紙の上で二次元的に記録する方法である。その原理は、水平面に対して対象を直交に投影する正射投影を行い、形状等を線画で記録することである。必要な場合は直交する数方向からの記録も行われる。記録されるのは、投影された対象の形状、寸法、文様、製作技法などの特徴である。通常は肉眼で対象物を見る場合は、眼球からの中心投影になり近くものは大きく遠くものは小さくなるなど形状・寸法にゆがみが生じるため、建築設計図と同様に実測図では正射投影が行われる。

しかし、対象を正確に記録しているかということ必ずしもそうではない。まず、表面の質感や色調のようなデータは線画では表現が難しい。この場合は文字で記録を添付することが行われるものの図には、十分に表現されてこない。作図は三角定規・デバイダー・真弧・キャリパーなどを用いた手作業で行われるが、当然ながら人によるものなので、ある程度の誤差が生じることはやむをえず、誤差の程度も観測できない。また、土器・陶磁器の場合は横断面が原則として円形であるという仮定に基づき記録することが多いが、実際に円形をしているわけではない。土器の場合は、中心線からの距離が遠くなるにつれ縁辺部は紙上では幅が狭く記録されることとなるため、端に近づくほど記録は困難となる。特に、装飾的な縄文土器や染付け陶磁の文様のように作図の対象が複雑なほど、文様が狭い範囲に凝縮されるため、作図の困難さは増大する。そのため、熟練した作図者は、簡略化や横断面円形の仮定に基づいた機械的な配置(割付)を行うことで、実測工程を効率化することを行う。また、石器については、リングやフィッシャーを実物どおりに

記録することは不可能であり、製作過程や打撃の方向を示す情報がより明確化できるように簡略化を行う。以上のように、実測図に厳密に正確な記録が行なわれているわけではなく、一種の記号化が行われているとあってよいかもしれない。しかし、寸法はほぼ正確であり、製作者の意図・技術、使用による変形などが模式的に表されていることで、対象に対する理解が容易となるように工夫されている。つまり、製作段階の志向、製作の結果、その後の変形というような数段階の情報をひとつの図面に組み込み、模式的に対象の特徴を示すことが、対象を一目で理解することを可能にしているのである。

そのために重要になるのが作図者の観察の力量である。対象物が製作され使用される過程に関する知識・観察力が不十分であると、適切な観察が行われず、成果である実測図には十分な情報が盛り込まれない。また、作図者の意図や視点によっても実測図に違いがでる場合がある。時代や地域性などのそれぞれの対象が持つ属性をより効果的に示すために作図者は、その属性を最も効果的に示すように、必要な情報を選択し強調するなどの工夫を行う。これは作図者の解釈ともいえる。そのため作図者が異なると、実測図の出来上がりも異なるものとなる。例えば、土器に入っているヒビを実測図に記録するかどうかというような違いはこのために起こる。そのために、報告書が刊行され図面が公開されている遺物に対しても、考古学者はわざわざ実物を見て実測図を作成する作業を行うのである。最低限の共通項は存在するが、同時に、実測を行う際に個々の作図者は、自分に必要な情報の選択も行っているのである。実測図が作図者の主観や力量に左右されるというのは実測図の持つ問題点ともいえるが、一方では作図者が自分の観察や視点を具体的に示すことができるという点で、すぐれた方法であり、またそのことが他者に対しても遺物の理解を助けることとなっているのは間違いない。ただし、実測図の大きな問題点は、いかに熟練しても、作業時間はそれなりにかかるという点であり、また熟達のためのトレーニングにかかる時間・手間も大きい。この点で、大量のデータ作成のためには、人手を増やすしかなく、コストも増大してしまうのである。

二次元的な方法で従来実測図とともに活用されてきたのがアナログ写真である。写真は実測図と相互に補完する形で、遺構や遺物などを記録してきた。写真も肉眼と同様に中心投影であるため、ゆがみは生じるが逆に肉眼に近い形で記録することができ、陰影も記録されるので、立体的な実物に近い記録とできる。そのため、遺物の質感などを見るためには実測図よりも写真の方がすぐれている。つまり、寸法については実測図の方が正確であるが、実感性は写真の方がすぐれており、カラー写真を用いれば色調も再現できる。露出・ピント・照明などを適正に合わせるという難しさはあるものの、実測が困難で時間を要する複雑な模様なども、写真では即座に記録が可能である。しかし、フィルム撮影の場合、撮影したフィルムの現像・焼き付けや、リバーサルフィルムの場合にはルーベなどでの確認が必要であった。また、撮影したフィルムを長期保管するためには劣化を防ぐための温度管理された保管庫が不可欠であった。撮影結果の管理もフィルムに撮影記録を付加する、焼き付けを貼りつけた記録を作成することなどの作業を行い、かなり

の手間がかかった。

実測図も写真も実物を二次元に投影したという点では同様であり、投影法が異なるためそれぞれが単独で実物を再現するのが難しいことから、併用して用いられてきた。そして、それらを公開・活用するための媒体が報告書・書籍等の印刷物であったといえる。つまり、実測図・写真ともに媒体に対応した形態であったことも確かである。

(2) デジタル計測の特徴

デジタル記録とは、従来紙図面やフィルムなどに記録された内容を電気信号に変換したものである。現在では、その記録はハードディスク・DVD・SSD・SDなどの電子媒体に保管される。デジタル計測とは、計測データを即座に電子信号化し、記録媒体に保管する形で行われている。デジタル計測として、最近普及しつつあるのが3Dスキャナーである。平面的な記録に対して、3Dスキャナーは立体物をそのままデータ化する装置であり、近年普及しているのはレーザー光を用いて対象の表面を計測して三次元情報を得る機器である。大型で遺構や遺跡全体の計測に用いられるものから、数十cm程度の寸法のものを対象とする小型品まで様々な製品がある。特に後者は低価格化し計測事例が増えている。

3Dスキャナーのデータは三次元の点の群として記録される。点群から、それらを結んだワイヤーフレームやポリゴンなどのモデルを作成し、立体を表現することができる。また、同時に撮影した画像を立体モデルに貼りつけることにより、本物に近い質感で対象を再現することができる。データは三次元の位置情報であるので、寸法や形状の誤差は機械や気温等の条件に左右されるが、誤差の程度は認識でき、手作業で行われる実測図の精度よりも高いことは確かであろう。さらに、非接触での計測が可能である点は対象物の保存という観点からも有効で、保存状態が悪く接触が困難な対象にも計測が可能である。

デジタル写真もデジタル計測に転用可能な記録である。フィルムからデジタル素子に記録媒体が変わり、写真画像のデジタル化が一気に進んだために大きな状況の変化が生じている。まず、現像・焼付けという工程を経ずに撮影結果が即座に確認できるようになった。そして撮影した画像は即座に利用が可能となり、迅速に活用が行われるようになった。現在では、その日のうちに調査日誌やweb・SNS等での公開に用いることができるのである。そして、データは、ハードディスク等の電子媒体への保存で済み、それらの大容量化に伴い大量のデータ保存が可能になっている。一方、フィルムが不要になったため、空調の整った特別な保管庫の必要性もなくなり簡便化が進んでいる。ただし、画素子の大きさやダイナミックレンジの幅などから見て、アナログ写真とデジタル画像には情報の質に差があるともいわれるが、フィルム・現像・焼き付けや保管にかかるランニングコストが大きく軽減されることや、簡便性の重視などから、デジタル化への移行が大きく進んでいることは間違いない。

デジタル化とともにカメラそのものの電子制御やオートフォーカス技術の進歩も、変化をもた

らしている。もちろんこれらの技術はフィルム時代から存在したが、フィルム交換が不要となり、ピントや露出合わせも自動ないしリモート操作で行うことができるようになったため、様々な活用が可能となってきた。例えば、遺跡の撮影においては、多くの場合高所からの俯瞰が必要となる。そのためにローリングタワーや高所作業車等を用いて撮影することが、通常行われている。また、写真測量のための空中撮影が行われることも多い。しかし、住宅地内の小規模な発掘調査や海外での調査では、このような設備を用いることが難しい場合が多い。そのため、俯瞰撮影も脚立の使用程度にとどまる場合もあった。しかし、気球やラジコン機等を利用して、モニターを地上で見ながら遺跡を空撮することが可能になり、カメラをボールの先に装着して撮影する方法も開発され、大型の装備を必要としない俯瞰撮影が普及しつつある⁽¹⁾。

写真測量は、専用のカメラと大型の図化器を用いる方法が一般的であったが、写真のデジタル化にともない、デジタル画像を用いる本格的な写真測量ソフトウェアが開発され、コンパクトカメラのような一般的なデジタルカメラで撮影した画像からパソコン上で写真測量を行うことが可能になった（津留・村井 2011）。ソフトウェアの価格も100万円を下回るものが現れ、考古学者が写真測量を業者に依頼せずに、研究室で実行することも可能になってきたのである。ステレオ写真からオルソ画像（正射投影画像）を作成し、実測図を作成することも容易となる。また、結果が点群データとして取得されるため、3次元情報としての利用が即座に可能となる利点がある。つまり、従来の図化のみにとどまらず、多様な利用が可能となってきたのである。さらに最近注目されているのが、3D画像を撮影するコンパクトカメラの出現である。これは古くから行われてきた立体視を応用したもので、2つのレンズにより2枚のステレオ画像を同時に撮影して、立体像を作り出すものである。従来の大がかりなステレオカメラを究極的にコンパクト化したといってもよいかもしれない。そして、立体像にとどまらず、このカメラを用いた3次元計測法も開発されている⁽²⁾。

（3）デジタルデータ利用の現状

印刷物媒体を前提とした従来の2次元の図と写真は、考古学・文化財の分野では、重要な役割を果たしてきた。その重要性は現在も変わらない。特に実測図は、遺物についての解釈が含まれていることが大きな特徴であり、単なる計測とは異なる意味があると考えられる。

しかし、大勢ではデータのデジタル化が進行している。測量・実測・撮影については、デジタル記録・計測を用いることで、大幅に作業が効率化されてきていることは間違いない。例えば、正射投影図を作製し、実測図の作製を効率化することに用いることは、実測図作成の延長として、すでに行われている。すでに述べたように、写真についてはデジタル化が進み、報告書でもデジタル画像を図版に組むようになってきた。従来、実測図は、報告書では製図ペンを用いた墨入れ図の形で公表されてきた。現在は、スキャナーで図面を呼び込み、それを作画ソフト上でトレースし図版を組むようになってきた。さらに印刷にもデジタルデータが用いられることが一般化し

てきた。

しかし、この段階はまだアナログ時代の形態をそのままデジタル化したということになる。扱われるデータは2次元のままであり、作業内容も大きくは変わらない。紙ベースの資料を電子化したのみで、データの編集や受け渡し・保管は簡便になるものの、計測データを新たな形で利用することはできない。

一方、上記した3次元デジタル計測は、効率性と正確さの点で従来の実測図にまさり、3Dデータの取得が可能となる点で、活用の幅が広がる利点がある。写真測量に用いる以外に、3D動画やビューワーを用いて、遺跡や遺物を立体的に表示する事例がweb上では増加しており、博物館展示などにも利用されている。画像を動かすことのできる3DPDF化したデータも公開されることが多くなった。このように、資料をいろいろな角度から視ることで、対象をより具体的に理解することが可能になる。特に3DPDFは比較的簡単に作製が可能であり⁽³⁾、ほとんどのPC上で閲覧が可能のため、有効な表示手段である(金田他 2010 p.134-135)。

3. 3D スキャナー活用の事例

(1) NextEngine による三次元計測

低価格化を代表する3DスキャナーがNextEngineである。アメリカでの販売価格は2995米ドルであり、高機能ソフトウェアを加えても4000ドル以下で購入ができる。代理店で購入しても価格は50万円以下であり、数百万円した従来の機種と比べ格段に安価になっている⁽⁴⁾。欧米では考古学や文化財への応用も進み、日本においても使用法や事例が紹介され(金田他 2010),



図1 NextEngineを用いた計測

計測の利点や問題点なども指摘されている（木本 2010）。また、精度の検定なども行われており、精度の信頼性が高い。しかし、日本においては三次元データの活用はまだ一般的とはいえ、応用もまだ手探りの状態にある。そのため計測事例も不足しており、多様な対象に対して試行し、活用法や問題点を検討していく必要がある。そこで筆者らも実際にこの3Dスキャナーを利用して、三次元データを取得し、その利点や活用法を検討することとした。

今回計測の対象としたのは、縄文土器の突起付浅鉢、軒丸瓦、黒曜石製石器の3点である。検討内容は、計測にかかる時間・手間、計測に関わる問題点、計測結果の有効性である。以下、個々の事例について述べていく。なお、NextEngineで取得した各データについては、3次元データファイルとして広く使用されているWavefront社のobj形式での書き出しを行った。objファイルは多くのソフトで読み込み可能であり、今回はItarian National Research CouncilのVisual Computing labが開発し無料で配布されている三次元の点群・メッシュ処理を行うソフトであるMeshLabを用いて、読み込んだ。MeshLab自体もビューワーとして使用できるが、読みこんだデータをさらにU3D形式ファイルに変換しPDFファイルへの貼り付けを行うと、PDFのビューワーソフトであるAcrobat Readerで3D画像を見ることが可能となる。また、obj形式のファイルから直接PDFファイルへの書き出しも、Bentley社が無償提供するCADビューワーであるBentley View V8iで実行することができる。以上のソフトを利用し、計測成果をPC上で表示しながら、実物・図・写真等との比較を行い、個々の遺物の三次元データの特徴と利点・欠点を検討した。

（2）縄文土器突起付浅鉢

この事例は、口縁部に1箇所、獣頭状の突起が付く小型の浅鉢である。外面は地文の縄文上に沈線文が、6区画に割り付ける形で複雑に施されている。沈線は幅約2mmの工具で、浅く施されている。最後に全体に軽くナデを施したらしく、部分的に縄文が消されており、口縁部付近は磨きに近く光沢を持つ部分もある。口縁内面にも1条の沈線文が走る。突起は、獣頭状に整形後ナデが施されている。内面は全面ナデが行われている。口縁径14.2cm、突起部器高11.5cm。

熟練した測図者であれば、さほど時間がかからずに実測が可能と思われるが、突起部分の配置などを工夫する必要がある器形である。計測は、土器を台上に傾けて設置し、突起部分の上面や内面も計測が可能な形で数方向から行い、合計8回の計測を行った。それらのデータを統合して完形のデータを作成することができた。内外面底部まで計測するために、何度か計測のやり直しを行ったために、計測個所の無駄が生じたものの、3時間程で完形のデータを得ることができた。計測工程は慣れてくると能率が向上したので、熟練すれば、さらに30分程度短くすることは可能であろう。

図2は、デジカメによる実物の写真と、MeshLabでテクスチャーを表示した状態で開いたobj

ファイルを比較したものである。形状・文様については、ほぼ実物どおりに計測がされているが、沈線や縄文は実物よりシャープさに欠けている。ただし、今回は計測速度を速めるため、解像度を最高値にしてはいないので、解像度を上げることで改善は可能であろう。また、テクスチャーは、数回の計測で明度・彩度等の異なる画像が重ねられ平均化されたため、実物よりも暗い色合いに変化してしまっているが、調整の様子などは確認が可能である。U3Dファイルを貼り付けたPDFファイルの場合は、正射投影と中心投影の両方で表示が可能であり、土器を90度ずつ回転させたものをプリントアウトして、トレースすると従来の実測図の作製も簡便にでき、データ取得後に土器の1/4をカットする形にしてからobjファイルに書き出すと、断面図と内面を表示した従来の実測図と同様な形で表現することも可能である（金田他 210 p.135）。しかし、それ以上に重要なのは、3DPDFファイルでは、回転して土器をあらゆる角度から視ることができる点で、内面や底部の調整なども実測図より具体的に確認することができる。



図2 計測データ（左）と写真（右）の比較（縄文土器）

（3）軒丸瓦

モンゴル国チントルゴイ城址出土の契丹時代の獣面文軒丸瓦を計測した。実物は完形であり、瓦当面は范型で、丸瓦部分は粘土紐桶巻造りで成形し、その後両者を接合したものである。建物の下り棟の先端に置いた瓦と考えられ、屋根への設置時に丸瓦部分の両側部が打ち欠かれ整形されている。長31.3cm、瓦当面径20.6cm。完形であるため、レーザー光を丸瓦の内部にあてて計測するために、全体で12方向からの計測が必要となった。しかし、それでも内部の一部については、レーザー光があてられず計測できなかった。このように、対象の形状により全体の計測が難しい場合がある。また、多方向からの計測が必要となったため全体の計測には4時間程度かかり、拓本・断面実測図よりも時間がかかると思われる。しかし、計測の結果、図3のように瓦当・平瓦粘土紐の接合の様子、内部の布目や紐、模骨痕、外部の削りなどの表面調整などがよく記録され、瓦の成・整形の様子が詳しく観察可能である。なお、多方向からの計測によりテクスチャー

が平均化され色調が大きく変化したため、成・整形や表面調整などの個々の技法の特徴を詳しく観察する場合にはテクスチャーを用いない方がよい。瓦当文様については、土器と同様にややシャープさに欠けるが、獣面の形状はよく記録されており、木本拳周の指摘のように、3Dデータの方が拓本よりも詳細に形状を知ることができることは確かである（木本 2010）。実測図ではこのような表現は無理であり、拓本でも細部を記録するのが難しい。今回は、断面を表現することはしなかったが、断面図の作製においても、キャリパー等を用いた実測よりも正確であろう。また、写真はこのような遺物の場合、丸瓦の内部撮影の際に、照明の加減が難しく記録が難しい。以上のように、瓦に関しては技法の表現においては実測図・写真よりも優れており、瓦当面の同范の確認にもより効果的であると思われる。

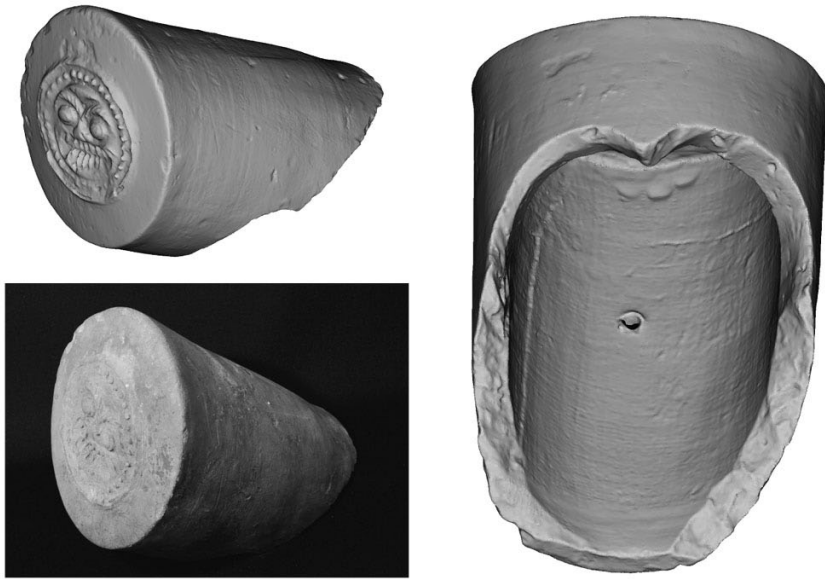


図3 計測データ（左上・右）と写真（左下）の比較（軒丸瓦）

（4）黒曜石製石刃核

レーザースキャナーの問題点として、光沢のある対象や黒色系の対象の計測が、レーザー光の散光や吸収のため困難である点があげられている（金田他 2010 p.40-42）。黒曜石は黒色系でかつガラス質であるため、レーザースキャンにはもっとも向かない対象といえる。このような対象の計測の可能性を探るため、あえて試行してみた。

対象は高9.8cm、幅6.3cmの打製石刃核である。そのまま計測すると、計測できない部分が多くなるため、反射防止の専用雲母パウダーを表面に塗布して計測した。そのため、反射はかなり抑えられたが、テクスチャーは全体が白っぽくなるため、実物とはかなり異なるものとなる。また、黒曜石はガラスと同様であり、実際の剥離の境目やエッジはかなりシャープなものになる。一方、

レーザー計測は、剥離のエッジ部分で必ずしも計測を行っているわけではないので、結果は実物よりもシャープさに欠け、かなりエッジが甘い雰囲気になる。比較すると図4のようになる。エッジについてはどうしても計測できず、空白となる部分も残った。また細かい剥離も認識が難しくなっている。リングやフィッシャーなどの微細な特徴についても、この計測では十分に表現できていない。同様な現象は土器・瓦でも確認されたが、石器の場合は剥離の重なり・境目・特徴がより繊細なため、レーザー計測のピッチでも計測しきれないのであろう。しかし、逆にテクスチャーを被せるとより実物に近くなり、エッジの甘ささほどは気にならなくなる。しかし、上記したようにこの石核はパウダー塗布のため色調がかなり変化し、実物とはかなり雰囲気が異なるものとなった。

細かい剥離やエッジ、リング等については解像度を上げたり、計測位置を工夫したりすることでそれなりに改善されるかもしれないが、それでも実物とは差があると思われ、フィッシャーなどは表現できないであろう。ただし、実物との位置差はごく微妙なものであり、平行投影で表示した図をトレースし全体形状を作図することで、実測の簡便化を図ることは可能であろう。しかし、熟練した実測者の場合は、単体の石器であれば、従来の実測の方が早く記録作成できると思われる。ただし、大型のコアや接合資料については、レーザー計測から平行投影図を作成することで作業の簡便化が図れる可能性はある。また、黒曜石以外の石材の場合には、テクスチャーの貼り付けも効果的と思われる。しかし、いずれにしても黒曜石製石器についてのレーザースキヤニングの結果は、予想されたように多くの課題が残る結果となった。

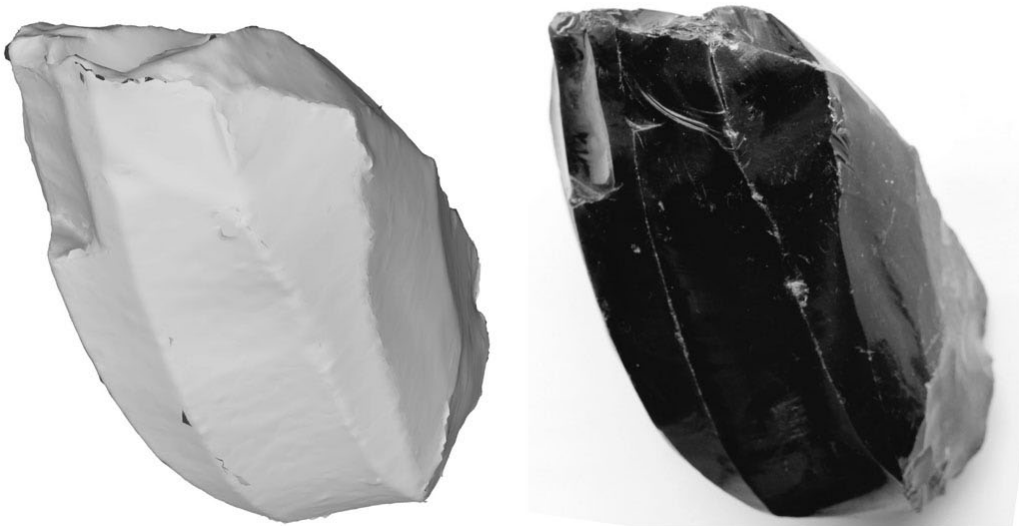


図4 計測データ(左)と写真(右)の比較(黒曜石製石核)

（5）計測データ活用の課題

以上のように、計測対象それぞれの特徴に応じて3D計測のデータには、利用できる範囲に差があることがわかった。土器・軒丸瓦については、十分に効果的なデータが得られ、様々な用途にデータを用いることが可能であることが確認できた。図面や拓本では表現が難しい部分、あるいは写真撮影が難しい部分についても、良好に画像を提示できる点は優れている。特に、博物館等での展示においては、実物とともに3D動画やビューワーを用いることで、実物の観察が難しい部分についても情報を提供することができる。また、計測結果そのものも図面や写真以上に詳細かつ精度の高いデータを取得することができる部分もある。しかし、凹凸が激しい部分や縁辺部については実物よりも、起伏・深度・シャープさが劣る傾向も見られ、対象に応じた適正な計測解像度や計測角度などを考慮して、計測手順を確立していく必要がある。この点は、多様な対象の計測を通して、検討していく必要がある。

一方、黒曜石製石器のような条件の対象では、計測結果と実物との差異が顕著となり、そのままデータを使用することは難しい。川口武彦は、石器の計測結果を展開図や断面図の作製に利用することが有効であると指摘している（金田他 2010 p.25-26）。今回計測した石核でも詳細部の十分な表現は得られなかったが、石器の外形・規模については大きな誤差は生じていないので、そのような使用は可能であり、レーザー計測に不向きな対象でもそれなりに利用価値はある。計測法などを工夫することで、データの改善を進めることも考慮していきたい。しかし、レーザー計測による三次元データ化にも、現状では一定の限界があることは確かであり、対象に応じて写真測量・計測などの他の方法も併用していくことが現状では必要である。特に大型品や遺跡の測量などの場合は、レーザー計測は必要な計測機器の価格や運搬のコストがまだ高く、博物館などの地方自治体機関や大学などでは簡単に導入できず、海外調査にもデメリットが多い。近年の写真測量・三次元データ計測は、これらの点ではレーザー計測よりも優れた点が多く、より導入がしやすい。

しかし、写真測量をより効果的に行うためには、より良質な撮影法を検討していく必要がある。

4. 画像特徴に基づく高精細空撮画像の生成

（1）空撮技術の有効性

デジタル的な計測の中でも、デジタル写真の利用は、すでに一般化しているといつてよい。また、すでに述べたようにデジタルカメラを用いることで、写真測量など写真の応用の幅が広がっている。本章では、特にデジタル撮影による空中撮影について検討してみたい。空撮技術は、様々な分野で活用されている。例えば、文化財調査においては、大型遺跡の俯瞰撮影や、建造物等の文化財の状況記録、文化財資料などに利用されている（鳥取県埋蔵文化財センター・国土交通省鳥取河川国道事務所 2008）。また、映像制作においては、ハイビジョンカメラを利用して、重要文

化財や動物などの撮影が行われている(阿久津・外村 1996)。さらに、災害・防災調査では、地震、地滑りや河川の氾濫などを調べるために有効な技術である(大倉他 2010, 長谷川他 2001, 佐治他 2010)。また、2011年3月に発生した福島第一原発事故において、高濃度の放射線が放出されたため、無人ヘリコプタを利用して撮影し、事故状況を把握することが可能となった。

このように、空撮技術は、非常に応用の幅が広い重要な技術であることがわかる。しかしながら、現在の空撮技術は、撮影画像の質の維持と撮影の安定性を求めるために、システムが大型化し、コストも高くなる。高精細画像を得るためには、一眼レフカメラや少なくとも解像度やレンズの質が高いコンパクトカメラが必要となる。さらに、撮影には高度の操作技術も要求される。このため、ラジコンヘリコプタや無人飛行船を自動操縦し、空撮映像を得るシステムの開発も進んでいる(藤原・野波 2005, 大倉他 2010)。しかしながら、このようなシステムで空撮を実施する場合には、輸送・電力確保・機材のコストが高くなり、特に国外などでは、時間的制約なども生じるため、容易に空撮を行うことはできない。そのため、空撮にはまだ特別な業者への委託が一般的となっており、コストも高いままである。

一方で、近年、急速に技術応用が進んでいる画像処理は、考古学分野においても、様々な活用がされている。例えば、画像計測技術は、遺跡の計測時間を大幅に短縮できる技術である。一般的にはステレオ画像を撮影し、各画像から対応する点を抽出することで、距離を計測できる技術で、図面化を短時間で行うことができる。さらに、レーザレンジファインダを組み合わせて、遺物や遺跡の高精細デジタルアーカイブ化が実現できている。そこで、本研究は、システムが大型化する空撮技術を、画像処理技術を用いることで小型化し、考古学・文化財の専門家が自ら簡易に空撮できるシステムを構築することを目的とする。本システムの特徴は、撮影後に後処理を実施することで、撮影するカメラや、カメラを搭載するラジコンヘリコプタを小型化することができコストも下げることができる点である。

(2) 画像合成に関する研究

隣り合う複数の画像を合成する方法は、従来から研究されており、一般的には、イメージモザイクと呼ばれる。利用する画像が静止画か動画像かによって手法は分かれる。すなわち、複数の静止画同士を合成するフォトモザイクと、連続する動画像から画像合成をするビデオモザイクである。フォトモザイクでは、隣接する画像間の対応を求める必要がある。画像間の対応を求めるには、各画像から特徴点を抽出し、画像間の対応付けを行い、基準画像をもとに合成する画像を、平面射影変換を用いて変換することで、画像を合成することができる(千葉他 1999)。ただし、この手法は、画像中にある建物のコーナなど特徴が明確にある場合に有効であり、また2画像間の差が大きい場合には対応付けが難しくなる。

一方、ビデオモザイクは、フォトモザイクで利用する画像特徴に加えて、時系列情報を特徴として利用できる。例えば、動画像からエッジを抽出し、時系列情報に基づきエッジの角度変化を

求めることで、カメラの動き量を推定することができ、画像を合成することができる（藤原・野波 2005）。さらに、動画像から抽出したフレーム画像ごとに、水平・垂直方向それぞれに輝度分布を求め、各フレーム画像間の輝度分布相関に基づき動き量を検出し、フレーム画像を合成する手法が提案されている（長坂・宮武 1999）。この手法では、パン、チルト、ズームのカメラワークに対応した画像合成が可能である。

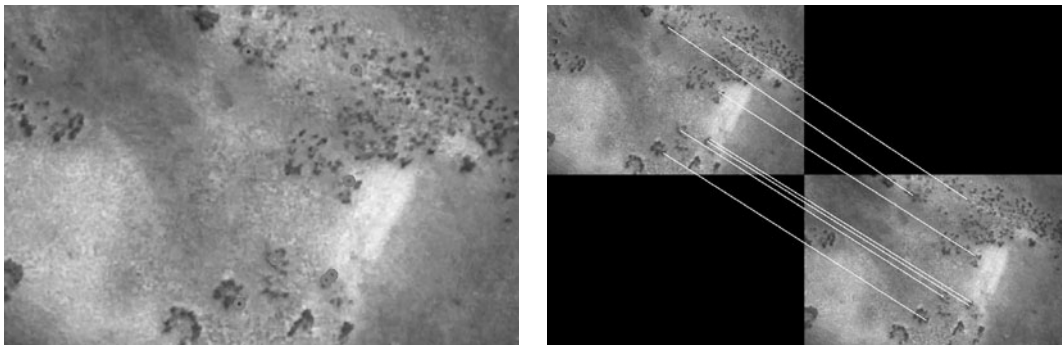
（3）画像処理の概要

本研究では、システムを小型化し、簡易化するため、ラジコンヘリコプタに小型のビデオカメラを搭載した。そのため得られる画像は基本的にはビデオモザイクになる。しかしながら、ラジコンヘリコプタを利用して撮影するため、風の影響を受けやすく、撮影される画像は、パン、チルト、ズーム、回転のカメラワークが組み合わされていることが推測される。すなわち、上記した輝度分布では対応できないことになる。

そこで、本研究では、まず、隣接するフレーム画像から回転、平行移動、スケール変化に頑健な画像特徴の1つであるSURF特徴量（Bay et.al 2008）を行い、画像間の対応付けを行う。次に、画像間の対応付けに基づき、隣接するフレーム画像の関係を平面射影行列で求める。さらに、平面射影行列を用いて画像を変換し、画像を合成することで空撮画像の高精細化を行う。以下に、本研究で利用するSURF特徴量と平面射影行列について述べる。

SURF特徴量と平面射影変換

隣接するフレーム画像を合成するためには、各フレーム間において特徴点を抽出し、対応付けを行う必要がある。まず、特徴点の抽出にはHarrisオペレータ（Harris 1988）を適用する。次に、フレーム画像間で特徴点の対応づけを頑健にするため、各特徴点をその周辺の画素から計算するSURF特徴量を用いて記述する。SURF特徴量は、一般的に、スケールの変化、回転、照明変化に対して比較的頑健である。図5（a）にフレーム画像から特徴点を抽出した結果を、図5（b）



(a) 特徴点の抽出結果

(b) 画像間の対応付け結果

図5 SURF特徴量による画像間の対応付け

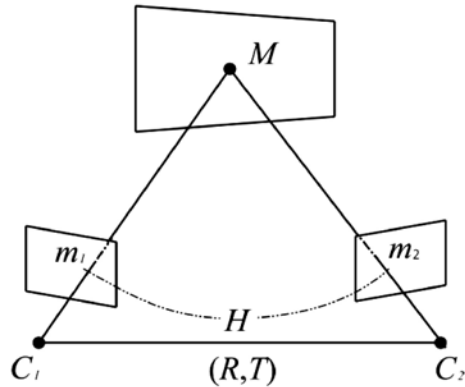


図6 平面射影変換

にSURF特徴量を用いてフレーム画像間の対応付けを行った例を示す。

(b) に示すように、2つのフレーム画像間で対応付け(対応する点同士を線で表示)が行われていることが確認できる。次に、この対応関係を用いて、画像を合成する方法について述べる。

対象としているシーンが遠景や、近くても平面的であれば、それらを単一平面とみなすことができる。本研究での撮影対象は、すでに消失した遺跡の土表面であるため、平面として仮定することができる。すなわち、図6に示すように3次元空間中の点Mを、ある視点C₁とその位置からカメラを回転(R)及び並進(T)させた視点C₂から観測したとき、すべての観測した点が3次元空間中で、ある平面上にあるならば、これらの各画像面での座標m₁、m₂の関係は線形であり、式(1)で表すことができる(Faugeras 1993)。

つまり、第1画像の座標点m₁=(x₁, y₁, 1)^tは、第2画像上で対応する点m₂=(x₂, y₂, 1)^tとすると、それらの関係は次式で定義され、ホモグラフィと呼ばれている。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{式(1)}$$

$$H = \begin{pmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 \sim は射影的に等しいことを示し、スケール因子が残る。式(2)の平面射影行列Hの未知のパラメータ数は8個であり、4組以上の対応点があれば、最小2乗法によりこの行列を求めることができる。

すなわち、隣接するフレーム画像からSURF特徴量を求め、フレーム画像間の対応点を用いて、式(2)のパラメータを求めることで、2枚のフレーム画像を合成することができる。これを連続的に行うことにより、空撮画像の高精細化が可能である。次に、上記の方法により実験した結果を以下に示す。

(4) 実験と結果

実験環境 本実験では、表1に示すような実験環境で空撮を行った。ラジコンヘリコプタに搭載できる重量が限られているため、本研究で使用する機器は、軽量のものを選択し、動画像で撮影した。また、表2に示すような環境で画像処理を行った。

表1 実験環境（空撮）

構成	型番・仕様	重量
GPS Data Logger	MBGR-1300DL	25g
ラジコンヘリコプタ	SkyKing ロータ長52cm、全長91cm	750g
小型ビデオカメラ	G200 解像度 1280×960	32g

表2 実験環境（画像処理）

構成	詳細
CPU	Intel Atom CPUZ550 2.0GHz
メモリ	2GB
OS	Windows 7 Pro 32bit
開発環境	Visual Studio.net 2008
画像処理ライブラリ	OpenCV 2.1



(a) ラジコンヘリコプタ



(b) 空撮の様子

図7 チントルゴイ遺跡における空撮

チントルゴイ城郭都市における実験結果 上記の環境で、モンゴル国ダッシンチレンにある契丹時代の大型城郭都市であるチントルゴイ城郭都市の空撮を試みた。チントルゴイ城は、トーラ川支流の旧河道に形成されたツァガンノール湖周辺の低地に囲まれた微高地部分にある。図7 (a) に撮影に利用したラジコンヘリコプタ (ただし写真は同型タイプ) を、図7 (b) にチントルゴイ城郭都市で撮影した様子を示す。

図8に得られたGPSデータの高度と速度を示す。高度は、比較的安定はしているが、速度にはかなりのばらつきがあることが分かる。撮影時に風の影響を受けやすく、速度変化が起きやすいことが明らかである。

さらに、図9 (a) にフレームが画像から画像特徴量を抽出した結果を、図9 (b) にSURF特徴量を用いて画像間の対応付けを行った結果を示す。また、図10に撮影した動画像からフレーム画像を抽出し、5枚のフレーム画像を用いて、画像合成した結果を示す。5枚のフレーム画像を合成することで、解像度は撮影した解像度と比べると1.67倍向上したことが分かった。

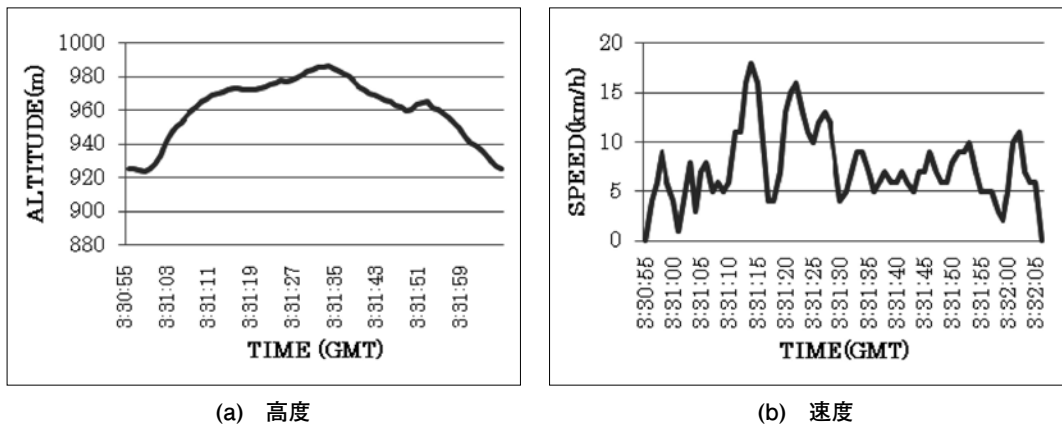


図8 ラジコンヘリコプタの高度と速度

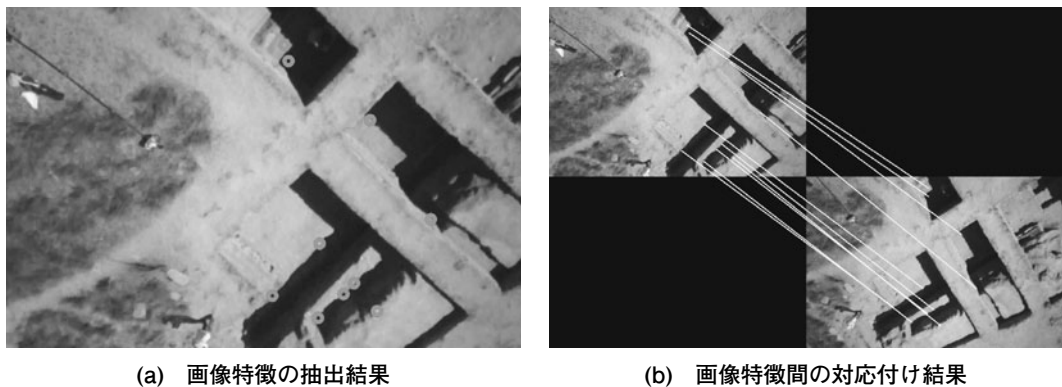


図9 チントルゴイ城郭都市北東門跡

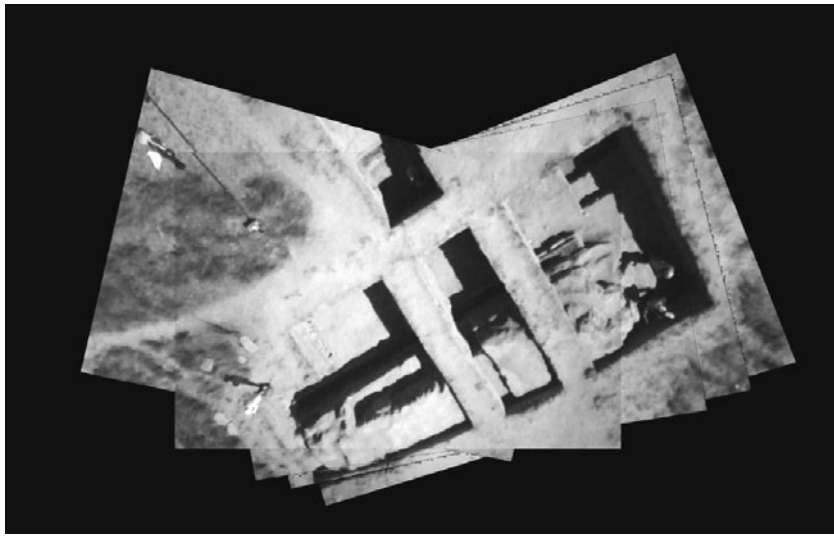


図10 画像合成結果（チントルゴイ城郭都市北東門跡）



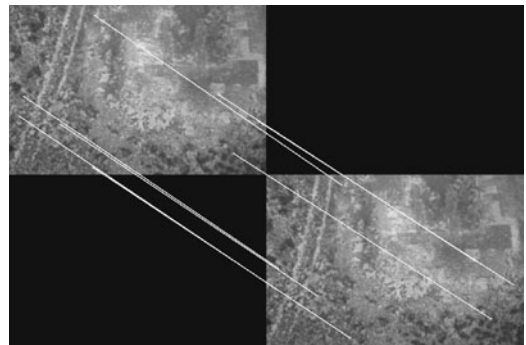
(a) 仏塔



(b) 空撮の様子



(c) 画像特徴の抽出結果



(d) 画像特徴間の対応付け結果

図11 ハルバルガス遺跡

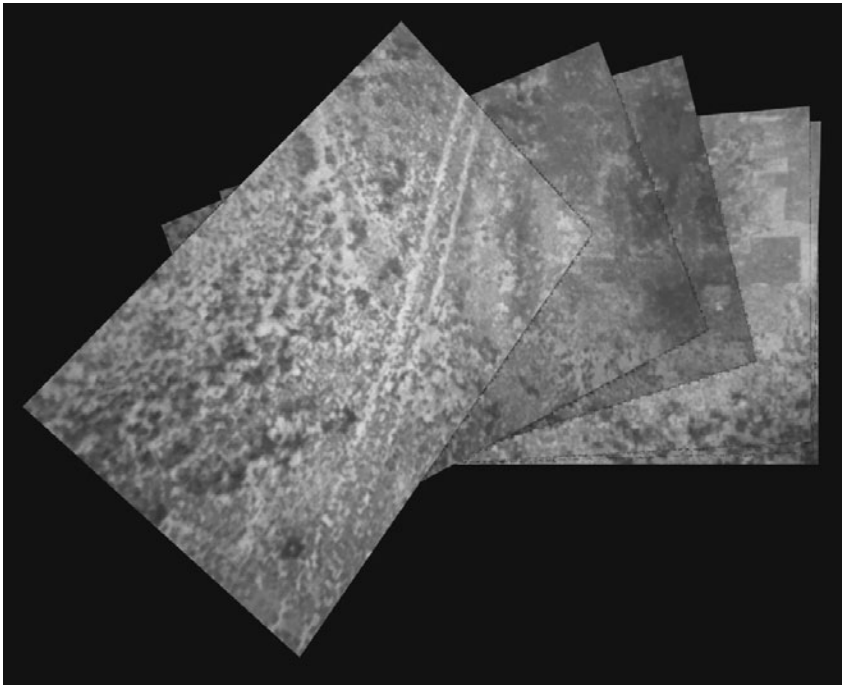


図12 画像合成結果 (ハルバルガス遺跡)

ハルバルガス遺跡における実験結果 モンゴル北部のオルホン川西岸に位置するハルバルガス遺跡において実験を行った。ハルバルガス遺跡は、8世紀から9世紀にかけてウイグル国の都城オールドゥバリクが置かれていた。2004年に、オルホン渓谷の文化的景観の名称で、世界遺産に登録されている。図11 (a) にハルバルガス遺跡に現存している仏塔を示し、図11 (b) にラジコンヘリコプタを利用して空撮している様子を示す。また、図11 (c) にフレームが画像から画像特徴量を抽出した結果を、図11 (d) にSURF特徴量を用いて画像間の対応付けを行った結果を示す。図11 (d) に示すように、各画像間の対応付けが行われていることが分かる。

また、図12に撮影した動画像からフレーム画像を抽出し、6枚のフレーム画像を用いて、画像合成した結果を示す。6枚のフレーム画像を合成することで、解像度は撮影した解像度と比べると1.90倍向上したことが分かった。

結果の有効性 本研究では、ラジコンヘリコプタに搭載した小型ビデオカメラを用いて、空撮された動画像から特徴点を抽出し、SURF特徴量を用いて画像間の対応付けを行い、平面射影変換に基づき画像を合成することで、高精細画像の生成を行った。

今回は画像処理を利用することで、空撮する機器を小型化することが可能となった。つまり、ラジコンヘリコプタが風の影響を受け、速度変化、方向転換が生じることによって、撮影画像は、スケール、回転変化が起こるが、それらの変化に比較的頑健なSURF特徴量を用いることで、安定した画像間の対応付けが行え、あまり解像度の高くない小型機器でも、高精細画像を生成することが可能となったのである。これは、特に解像度が高くないカメラでも、一眼レフ機などに近い高精細画像が得られ様々な活用が可能となることを意味している。一眼レフ機や高解像度カメラは重量が大きくなるため、使用するラジコンも大型化する必要がある、コストも相対的に高くなっていくが、小型の飛行機器で十分に必要な画質が得られることとなる。また、得られた画像を利用した立体視やオルソ（正射投影）画像の作成も可能にできれば、測量やGISへの活用も期待できる。

ただし、今後の課題は、次に述べるように主に2つある。第一に、空撮で利用するラジコンヘリコプタの軌道制御である。天候などの影響により、ラジコンヘリコプタは想定していた軌道を外れ、撮影対象をとらえることができない場合が生じている。このため、GPSなどを利用したラジコンヘリコプタの自動軌道修正方法を検討するとともに、小型無線などを利用して撮影画像を軌道で確認できるように改善する必要がある。

第二に、高精細画像の生成方法である。本手法では、撮影対象を平面で仮定しているため、複雑な構造を持った遺跡を空撮した場合、画像を合成することができない。そのため、空撮画像を多面体で近似し、面ごとに平面射影変換を行う必要性が生じる。

今後は、上記に述べた問題に対して、更に手法の検討を進めていく予定である。

結 語

以上のように、本論ではレーザースキャナー三次元計測とデジタル画像による空中撮影法の検討を行った。三次元計測は今後も機器の開発と普及が進むと思われる、考古学研究や博物館展示、文化遺産の資料化などに活用されていくことは間違いなさだろう。しかし、レーザースキャナーには対象の向き不向きがあり、対象や計測の目的を明らかにした使用が必要である。また、従来の実測図・写真との関係であるが、現状では従来の記録自体もまだ役割を終えてはいない。実測図は、対象のいろいろな属性を簡潔に表現できる方法として優れており、研究目的の上では他の記録よりも使いやすいというメリットがある。また、遺物の質感を示すという点では的確に撮影された写真映像にまさるものはないであろう。しかし、それらと三次元計測データを併用することで、博物館や報告等での資料の提示のみではなく、あらたな研究分野を創生することも期待で

きる。今後は、三次元データを用いて、どのような分析・研究が可能であるかを考察していきたい。

また、デジタル高度撮影は撮影機器の軽量化や高解像度化が進み、撮影手順の簡便化や機器の低価格化により今後ますます普及していく可能性がある。しかし、現状ではまだ価格面や操作性の点で、どこでも導入可能な状態ではない。しかし、本稿の検討で、画像処理技術を応用することで低価格化や簡便化が図れる可能性を示すことができたものと思われる。現在、高度撮影のためのラジコン機についても安定性が高い多発ラジコンヘリなどが比較的安価に販売されており、これにミラーレス一眼レフカメラなどを搭載することにより、安定してより高精細な画像が得られるものと思われる。高精細画像は単純な映像記録のみではなく、そこから写真測量を応用して三次元データを計測することなども可能となるため、さらに活用の幅を広げることができる。今後は、機器の選択や操作性の高いソフトウェアの開発を進め、遺跡・建造物等の文化遺産に対して広く活用できるものとするを目標としている。

本稿の執筆にあたり、金田明大氏（奈良文化財研究所埋蔵文化財センター）と木口裕志氏（株パスコ）から多くのご教示と情報の提供を受けた。また、資料計測にあたってモンゴル科学アカデミー考古学研究所 A. エンフトゥル氏のご協力を得た。あらためてお礼申し上げる。

注

- (1)すでに多くの測量会社でラジコン機による空撮・写真測量が行われており、かなり一般化しているが、業務用ラジコン機の場合、画像転送装置や自動航行装置などを含めると機体は100万円以上の価格となり、考古学・文化財研究者にとっては簡単に購入できるものではない。また、CUBIC社はポールを用いた5m程度の高さからの俯瞰撮影が可能なシステムを販売している。
- (2)フジフィルムは、自社が製造販売を行っている3Dデジカメを利用した計測システムを開発し、ソフトウェア開発キットを提供している。それを利用した計測・測量システムも他社で開発されている。詳しくは下記HPを参照されたい。ただし、まだコスト的にはそれほど簡単に導入が可能なものとはなっていない。
http://fujifilm.jp/business/material/3d/3d_counting_system/index.html
- (3)従来は、Adobe社のPDF作成ソフトAcrobatの3D版を用いることが一般的であった。しかし、2008年に、PDFが国際標準規格となり、さらにAdobe社、Tech Soft 3D社、PROSTEP社、tetra4D社らにより3D PDF Consortiumが組織され、3DデータからPDFファイルを作成するソフトも数社から販売されている。
- (4)NextEngineは、日本でもRapidform Japan社により販売・サポートが行われており、導入は容易である。

参考文献

(邦文)

- 阿久津明人・外村佳伸 1996「投影法を用いた映像の解析手法と映像ハンドリングへの応用」『電子情報通信学会論文誌D-II』Vol.79-D-II No.5, p.675-684。
- 稲葉修二 2011「自律飛行可能なラジコン電動ヘリによる、番組用HD空撮の実現」『映像情報メディア学会技術報告』35(31), p.41-44。
- 大倉史生・神原誠之・横矢直和 2010「無人飛行船の自動操縦による空撮システム」『電子情報通信学会総合大会講演論文集』情報・システム(2) p.195。

- 門林理恵子 2010「三次元計測とその応用」『埋蔵文化財ニュース』139 遺跡調査技術集成 計測作業編Ⅰ レーザースキャナーによる三次元計測 奈良文化財研究所埋蔵文化財センター p.2-4。
- 金田明大・木本孝周・川口武彦・佐々木淑美・三井猛 2010『文化財のための三次元計測』 岩田書院。
- 木本孝周 2010「低コスト3次元スキャナーによる瓦のデジタルドキュメンテーションと比較 -瓦調査における3次元計測の導入と意義」『文化財の壺』創刊号 p.8-11。
- 佐治斉・田村裕之・小林真紀 2010「被災前後に撮影した都市域空撮画像の位置合わせ手法」『日本地震工学会論文集』第10巻第3号, p.119-122。
- 佐藤宏介・塚本敏夫 2002「遺物・遺構の三次元計測と認識」『電子情報通信学会会誌』85-3 p.166-170。
- 千葉直樹・蚊野浩・美濃導彦・安田昌司 1999「画像特徴に基づくイメージモザイク」『電子情報通信学会論文誌D-II』Vol.82-D-II No.10, p.1581-1589。
- 津留宏介・村井俊治 2011『デジタル写真測量の基礎~デジカメで三次元測定をするには~』 日本測量協会
- 鳥取県埋蔵文化財センター・国土交通省鳥取河川国道事務所 2008『松原古墳群の発掘調査報告書』。
- 長坂晃朗・宮武孝文 1999「輝度投影相関を用いた実時間ビデオモザイク」『電子情報通信学会論文誌D-II』Vol.82-D-II No.10 p.1572-1580。
- 奈良文化財研究所埋蔵文化財センター 2010『埋蔵文化財ニュース』139 遺跡調査技術集成 計測作業編Ⅰ レーザースキャナーによる三次元計測。
- 長谷川弘忠・山崎文雄・松岡昌志 2001「空撮ハイビジョン映像を用いた兵庫県南部地震による建物被害の目視判読」『土木学会論文集』No.682/I-56, p.257-265。
- 藤原大悟・野波健蔵 2005「GPSによる小型無人ヘリコプタの自律誘導制御・ホバリング制御」『計測自動制御学会計測と制御』44(4) p.274-277。

(欧文)

- Bay, H., A.Ess, T.Tuytelaars, and L.V.Gool 2008 "SURF: Speed up and robust features", *Computer Vision and Image Understanding* vol.110 no.3, p.346-359.
- Faugeras, O. 1993 *Three-dimensional computer vision: A geometric viewpoint*, MIT Press.
- Guidi, G., F.Remonodino, G.Morlando, A.D.Mastio, F.Uccheddu, and A.Palagotti 2007 "Performances evaluation of a low cost active sensor for cultural heritage documentation", *VIII Conference on Optical 3D measurement techniques*, p.59-69.
- Harris, C. and M.Sepkens 1988 "A combined corner and edge detector", *Proc.4th, Alvey Vision Conf* p.147-151.

Digital documetation and digital data utilization of archaeological and cultural materials

Advancement and spread of digital technology has brought a great change for recording materials of archeological and cultural heritage. In particular, three-dimensional measuring tools and digital cameras are becoming popular. Now it is necessary to consider the methods of more effective and convenient digital recording and the public usage of digitalized record. In this paper, authors have studied the effectiveness of three-dimensional measurement by laser scan and the technique of aerial photo by simple light devices. As a result, it was confirmed that the laser measurement is effective for recording and presenting shapes and manufacturing technologies of objects such as pottery or roof tile, and using image processing, authors have developed a method of making high-resolution images taken by a simple video device.