

# 異種計測技術の統合によるイドウトのマスタバの 3次元形状計測

安室 喜弘\* 伊藤 大地\*\* 西形 達明\* 吹田 浩\*\*\*

Heterogeneous Strategy for Scanning Mastaba Idout

Yoshihiro YASUMURO\*, Daichi ITO\*\*, Tatsuaki NISHIGATA\* and Hiroshi SUITA\*\*\*

## [Abstract]

On-site investigations for Egyptology include variety kinds of technical fields as well as archaeological specialty areas. Especially for maintenance and restoration of the historical ruins and cultural heritages like wall reliefs and paintings, ICP (Institute for Conservation and Restoration of Cultural Properties) in Kansai University organizes the research members from fields of civil, architectural, chemical, material engineering, informatics and computer science. To achieve the transversal studies in the organization, field-oriented digital archives are desirable for sharing the live information. This research promotes 3D shape measurement and modeling techniques to construct a virtual space that allows sharing the on-site information rooted from the environments of the field and discussing over the common target in a cross-sectional manner. This paper shows the shape scanning approaches to carry out 3D capturing of whole site of Idout mastaba in Egypt. Our goal is to utilize the scanned 3D information to construct a virtual space of the field of Idout mastaba, where not only ICP members but also other researchers and whoever connected on the internet might be able to visit in the near future.

## [要旨]

古代の文化財の保存や修復方法、活用方法について学術的に研究を推進する上では、エジプト学、文化財保存科学のみならず多くの技術分野の専門家による共同活動が必要となる。関西大学では、「文化財保存修復研究拠点」(Institute for Conservation and Restoration of Cultural Properties)において、このような多様な専門家からなる活動プロジェクトが進められており、筆者らは、その活動における情報共有の枠組みとして、現地環境を3次元モデル化したデジタルアーカイブの積極的な利用方法を提案する。3次元計測に基づいた形状再現と、そのデジタルメディア化によって、現地ならではの情報の共有と、意見交換の新たな仕組みの創出を試みるものである。本稿では、この取組みにおいて基盤と

---

\* 関西大学環境都市工学部

(Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Japan)

\*\* 関西大学大学院理工学研究科

(Graduate School of Science and Engineering, Kansai University, Japan)

\*\*\* 関西大学文学部 (Faculty of Letters, Kansai University, Japan)

なる3次元形状データ取得を現地で遂行するための計測アプローチについて述べる。エジプトのサッカラ地域にあるイドウトのマスタバを対象とし、マスタバ全体の外形、地上構造・埋葬室の内壁面、および埋葬室へ通じる立坑（シャフト）の内壁形状の包括的な3次元形状計測を実施した。それぞれの対象における規模と粒度を勘案して行った計測手段の選択と計画立案および実地計測の結果について報告する。

## 1 はじめに

エジプトのサッカラ地域にあるイドウトのマスタバは、歴史的遺産として著名であるだけでなく、特に地下の埋葬室の壁画（紀元前2360年頃）は、芸術的価値においても注目を集めている。関西大学では、2005年より行われた「日本・エジプト合同マスタバ・イドウト調査ミッション」によってイドウトの地下埋葬室の壁画修復プロジェクトの成果を踏まえ、2008年に「文化財保存修復研究拠点」(Institute for Conservation and Restoration of Cultural Properties) が設立され、古代エジプト時代の文化財を主な対象として、文化財の保存や修復の方法、活用の方法を多面的に研究を進めており、エジプト学、文化財保存科学、博物学、古典学、都市計画学、地盤工学、分析化学、微生物、高分子化学など、多様な専門家からなる構成員により活動を行っている。

筆者らは、このような多様な専門家からなる活動における情報共有の枠組みとして、現地の3次元モデルによるデジタルアーカイブの積極的な利用方法を提案する。3次元計測に基づいた形状再現と、そのデジタルメディア化によって、現地ならではの情報の共有と、意見交換の新たな仕組みを創出を試みるものである。本稿では、この取組みにおいて基盤となる3次元形状データ取得を現地で遂行するための計測アプローチについて報告する。

現地での計測は2010年から3年間にわたり実施された。2010年度は、マスタバ全体の外形の取得を目的とし、主に長距離の計測が可能な屋外用レーザスキャナを使用し、マスタバの外周、地上部分の内部壁面、および埋葬室の壁面を計測した。2011年度は、主に屋内用レーザスキャナを使用し、マスタバの地上部分内壁のレリーフについて、特徴的な部分に焦点をあて、劣化やレリーフの保存状態を詳細に計測した。2012年度は、身に着けて操作できる形状計測システムを独自に組み、地下の埋葬室へ通じる立坑（シャフト）の内壁形状の計測を試みた。

## 2 外周の計測

### 2.1 概要

屋外用構造物や地形の3次元計測に用いられるレーザスキャナは、パルスレーザによる飛行時間(TOF; time-of-flight)方式を用いたものが多いが、本プロジェクトにおいても同方式の、LMS Z420i(リーグル社製)を用いて計測を行った。本機は、クラス1の近赤外レーザパルス(波長 $0.9\mu\text{m}$ )を用い、最長約1,000m(反射率80%の対象)までの計測対象までの距離に対し、測定分解能4mm、角度ステップ幅 $0.008^\circ$ で水平 $360^\circ$ 、垂直 $80^\circ$ のスキャニング性能をもつ。USB接続によりホストコンピュータからスキャナ本体を制御し、リアルタイムにスキャンデータをコンピュータの外部記憶に格納する(Fig. 1参照)。スキャナの位置決めと設置、後述のマーカ設置、マーカのスキャンと水平分解能 $0.1^\circ$ の詳細

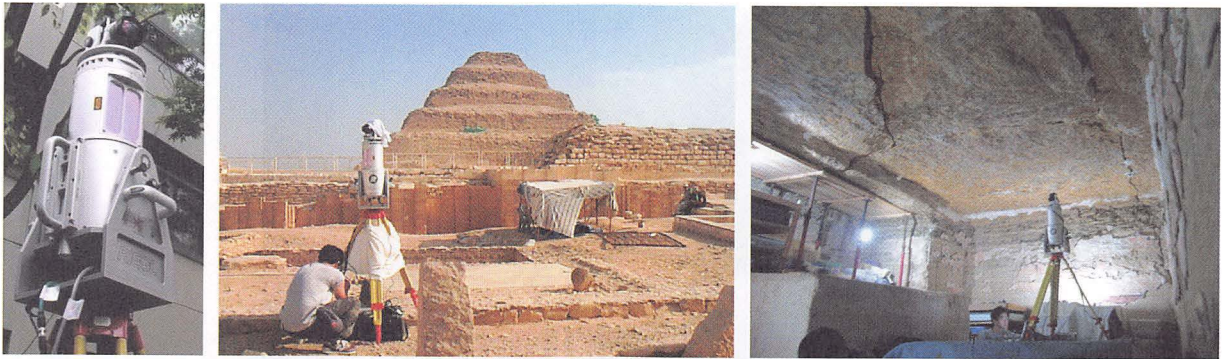


Fig. 1 屋外用レーザーキャナ (Riegl 社 LMS-Z420i : 左) と屋外計測 (中央) および内壁の計測 (右)

なスキャン、およびデジタルカメラによるパノラマ撮影を1セットの計測とした。約5～6時間の調査において、約8回までのスキャンが可能であった。

## 2.2 計測の経過

レーザーキャナによる計測データは、スキャナ本体から水平・垂直方向に角度を変えて照射されたレーザーの各方向に対する物体表面の点の距離の集合として得られる。これは通常点群 (point cloud) データと呼ばれる。本スキャナには、予め校正された高解像度のデジタル1眼カメラ (Canon D80) も装備しており、点群データの各点に対して、デジタル写真からカラー情報を割りつけて記録することも可能である。

また、水平・垂直方向ともにスキャン範囲の広い本機ではあるが、構造物の周囲を計測する場合や、構造上の配置により物陰になる部分は、一度には計測できない。したがって、スキャナの位置を変えながら、未計測の部位を新たにスキャンし、スキャン済みの部位のデータと統合することによって、全周の形状や、入り組んだ構造をデータ化することができる。2010年度8月～9月の計測においては、イドウトのmastabaを包含する外周の計測に28箇所、mastabaの地上部分の内壁の計測に34箇所、地下の埋葬室内部の計測に6箇所の異なる視点にスキャナを設置し、順次計測を行った。(Fig. 2-4 参照)

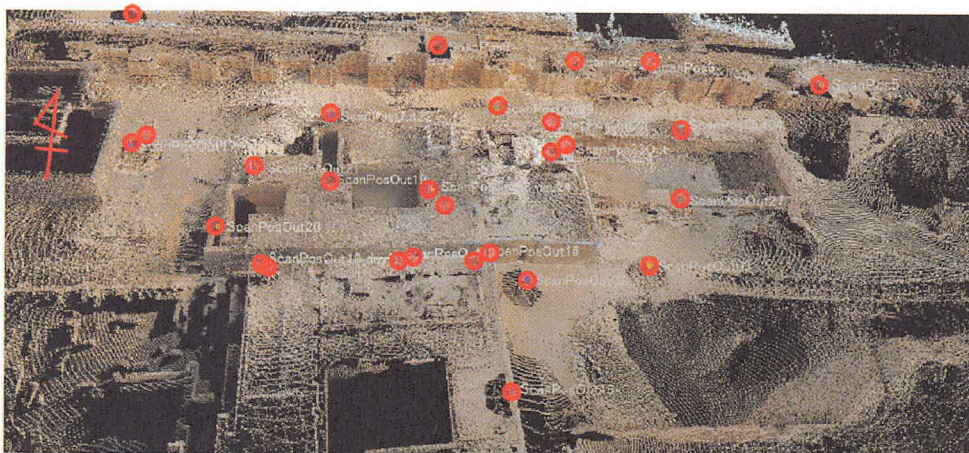


Fig. 2 mastabaの外周計測のための計測点配置

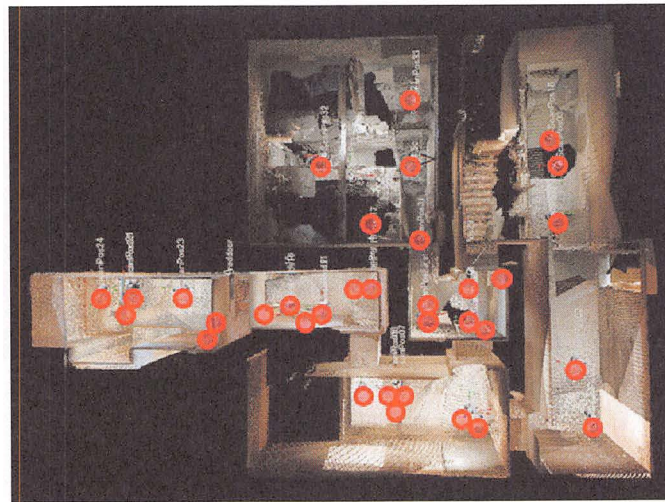


Fig. 3 マスタバ内壁計測のための計測点配置

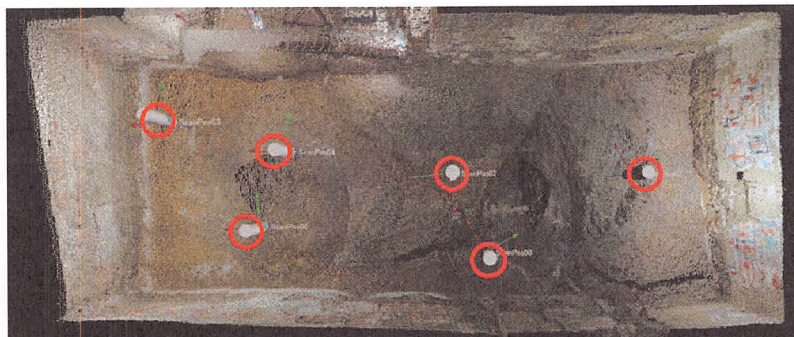


Fig. 4 埋葬室の内壁計測のための計測点配置

尚、それぞれ個別のスキャンによる点群データはスキャナ本体を原点とするローカルな座標系で表現された3次元座標の集合である。したがって、点群データ間で座標を一致させる座標変換（回転および平行移動）を求めて、統一した座標系で点群を表現することが、データ統合には必要となる。本プロジェクトでは、異なる視点で共通して見通せる位置に、反射マーカ（ $\phi 50\text{mm} \times \text{長さ } 50\text{mm}$ ）を4個以上設置してランドマークとして用い、この座標変換を求めるのに利用した。（Fig. 5 参照）



Fig. 5 反射マーカ（円筒型：左）と埋葬室にてマーカを設置した様子（中央）計測結果（右）

### 3 mastaba上部構造内壁の詳細計測

#### 3.1 mastaba上部構造

イドウトのmastabaの立抗の下にある埋葬室は、何度かの立ち入りがあったものの、基本的にはブロックで閉鎖されて手つかずの状態では保護されてきたのに対し、上部構造は、すでにエジプトの遺跡管理当局によって保存処理が相当進み、エジプトの文化財保護の基準も達成しており、一般にも公開されている。しかし、風雨や日光などの自然環境の影響に晒されている箇所も珍しくなく、また一般観光客による心無い損傷を受けることもあり、mastabaの現状を客観的に把握するという意味からも、本プロジェクトでは保護が進んでいるとされる上部構造にも詳細な計測の計画を立案した。

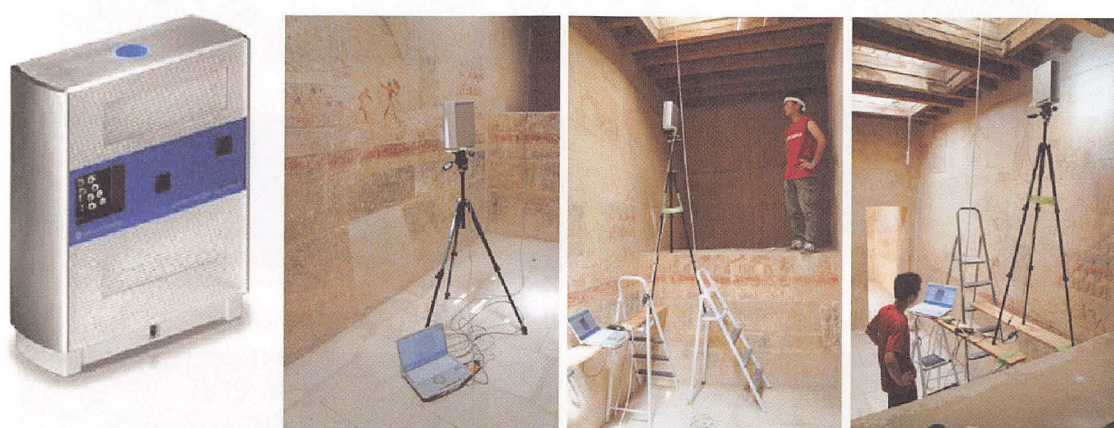


Fig. 6 卓上用レーザスキャナ：3D Scanner HD (NextEngine inc.) (左) と room IIIの西の壁の計測実施の様子

#### 3.2 上部構造内壁の記録

イドウトのmastaba墓の上部構造は、その内壁と屋根は発掘当時の壁面を埋め込む形で形成され、しっかりとした平屋の構造物として再現されている。内壁には、いたるところに美しいレリーフが施され、一部には彩色も鮮明に残っており、サッカラ地域を訪れる多くの観光客の目にもとまる象徴的な構造物である。その詳細なレリーフをデジタルアーカイブとして記録することは、現地を訪れる人以外にもその存在を伝達する有効な手段であるばかりでなく、今後の保全や公開の在り方を検討・提案していく上での元になる現状の記録としての価値も見出せると考える。ここでは卓上サイズのレーザスキャナによる記録を試みる。

利用したスキャナ 3D Scanner HD (NextEngine inc.) は、25万点の点群データを約 400 dpi の密度で取得することができ、深さ（距離）方向の精度が 0.38mm 程度である。このデータ密度と精度で微視的な凹凸を記録することによってレリーフの保存状況の記録を試みた。特に象徴的なイドウトの立像が描かれている room IIIとIXの西の壁<sup>[2]</sup>に対し、それぞれ 2011年度と 2012年度に計測を実施した。計測データの収集後に、形状による相関を利用して位置合わせをして統合するため、約 10%の重複部分をつくりながら、room IIIとIXの西の壁でそれぞれ 112個と 89個の距離画像データを取得し統合した。採光のためにも使われる天井の窓に近いところでは、痛んだ表面の様子が記録された。これは損傷

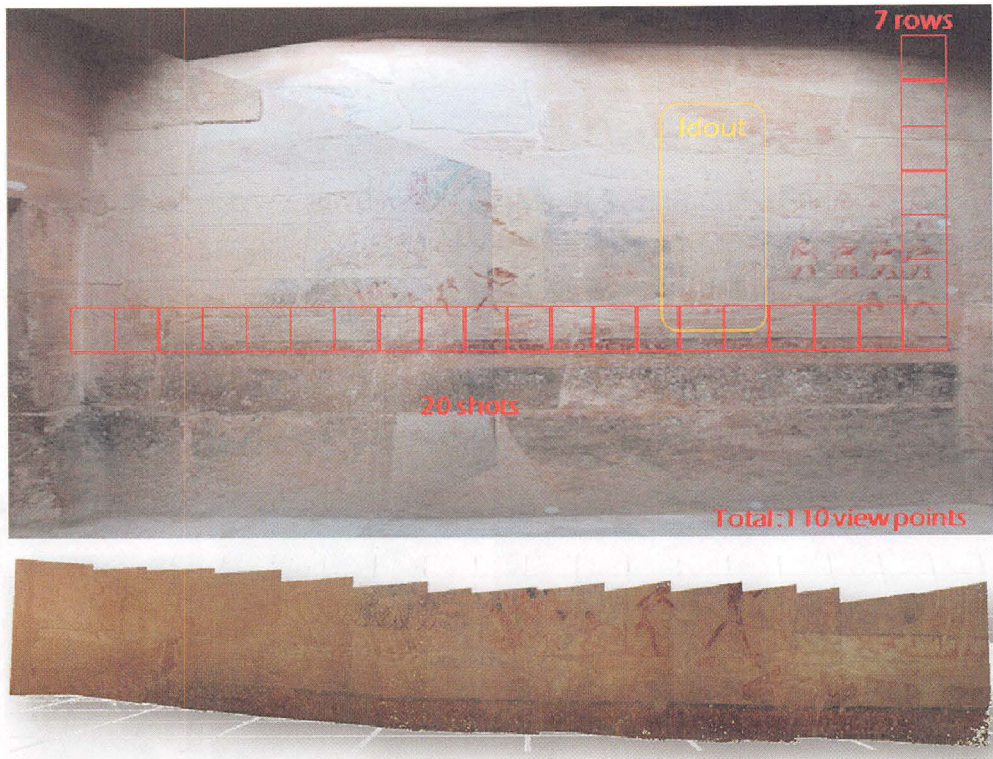


Fig. 7 room IIIの西の壁の計測計画（上）と1列分の3次元再構成結果（下）

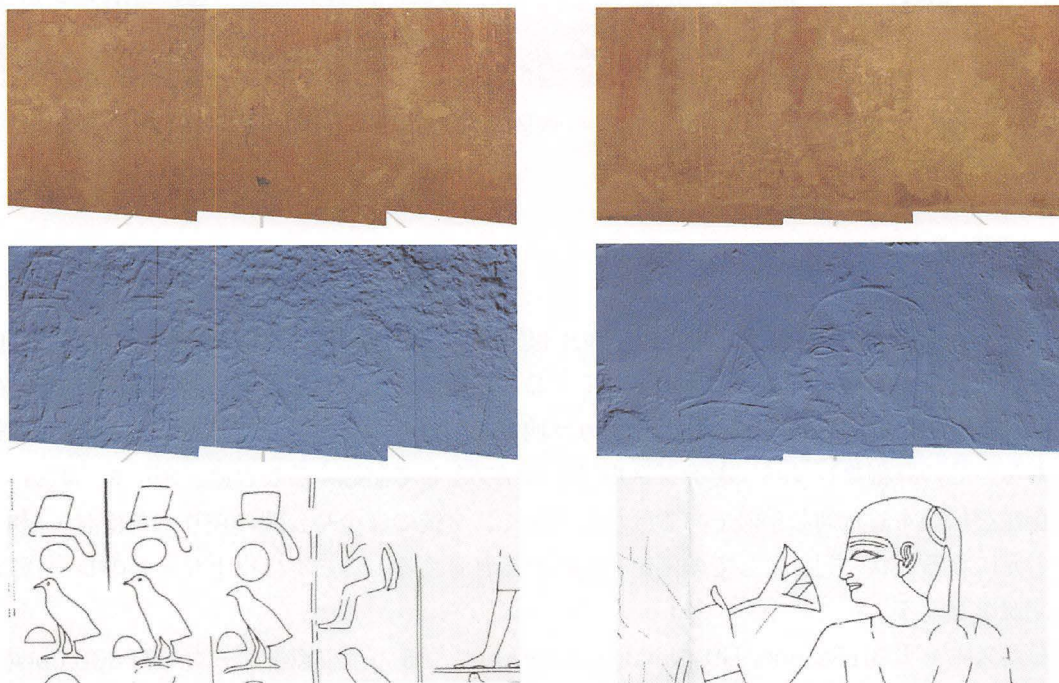


Fig. 8 計測例:西側壁面上部の劣化状況（左列）と劣化の少ないレリーフ（右列）上段はカラー情報、中段は3次元凹凸情報、最下段は文献<sup>[2]</sup>による。

を受けた時期の特定には至らないものの、表面の性状を客観的かつ3次元モデルとして記録する意味での有効性が確認できた。したがって、場所と損傷との相関を調べることによって、今後の保全や公開方法に対する指針を与える上での資料となるアプローチと言える。(Fig. 8 参照)

## 4 立坑の計測

### 4.1 概要

埋葬室へ通じる立坑（シャフト）は、幅約 1.5～3m 程度、深さ約 10m の垂直な縦孔構造でその壁面には層状の地盤や石組みが見られる。現地での調査や壁画の修復などにおいては、1本の梯子により、人間の出入りを行い、物品の移動には滑車による垂直な上げ下ろしを用いている。したがって、その壁面の構造や質感といった情報は、Fig. 9 に記される図面や上端や下端および、梯子に乗った状態でのカメラ撮影によって得られる記録しかない。また3次元スキャナなどの計測では、対象距離が近過ぎたり、あるいはスキャナ本体の移動や設置の手段に困るという物理的な問題があった。そこで本プロジェクトでは、近年、小型・軽量化され汎用のビデオゲームコントローラとして市販される RGB-D カメラの利用を考えた。RGB-D カメラは、距離画像センサとも呼ばれ、画像を使った三角測量の原理により3次元形状計測を行う。方向により異なるパターン(模様)をレーザーなどによって対象物に照射し、レーザーとの位置関係が固定されたカメラでこれを撮影する。カメラで撮影された対象物に投影されたパターンが、画像のどの部分に映るかを探索することによって、対象の各部位に対して、レーザーとカメラの双方からそれぞれどの方向にあるかが特定され、三角測量が適用できる。本プロジェクトでは、Microsoft 社製 Kinect センサを用いる。このセンサは、近赤外レーザーによりランダムなドット模様を照射し、近赤外カメラで撮影された画像から、各部位のドットパターンがどの照射パターンと一致するかを探索し、距離情報付きの画像（距離画像）をリアルタイムに得ることが出来る。市販品は、この距離画像からゲームユーザの身体形状を認識し、かつ四肢や頭部などの姿勢を検知してゲームへの入力情報として利用している。本プロジェクトでは、距離画像をコンピュータに取り込み、形状情報を収集するとともに、移動するカメラ本体の動きを推定して、収集した形状情報を統合する技術を立坑の内壁の計測に利用する。先述の通り、本来 Kinect センサは家庭でのゲーム機用入力装置であるため、屋内利用の仕様となっているが、立坑はその構造上、直射日光が届かず、カメラが照射する近赤外パターン光が妨げられにくいため、適した計測手段である。

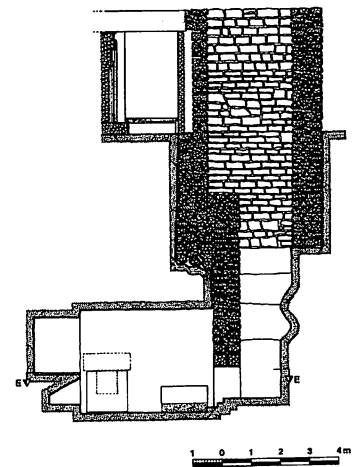


Fig. 9 立坑（シャフト）の構造<sup>12)</sup>

### 4.2 システム構成

我々は、梯子に乗ったままの移動と計測を可能にするために、家庭用電源の代わりにバッテリー駆動として Kinect センサを用い、ウェアラブル式のシステム構成を構築した。背負うタイプの軽量キャリアにノート PC を設置し、手元で PC 画面を確認できるように USB 駆動の 8 インチディスプレイを接続し、脱着可能な面ファスナーテープでヒジ部に装着できるようにした。また指に装着して使用できる指輪型の USB ワイヤレス式マウスを用意して、梯子に捉まったままマウスにより PC 操作が可能となる構成にした。Kinect センサは、ノート PC と USB 接続され、計測対象を狙えるように、やはり面ファスナーテープにてもう一方のヒジに装着できる装具を作成した。(Fig. 10 参照)

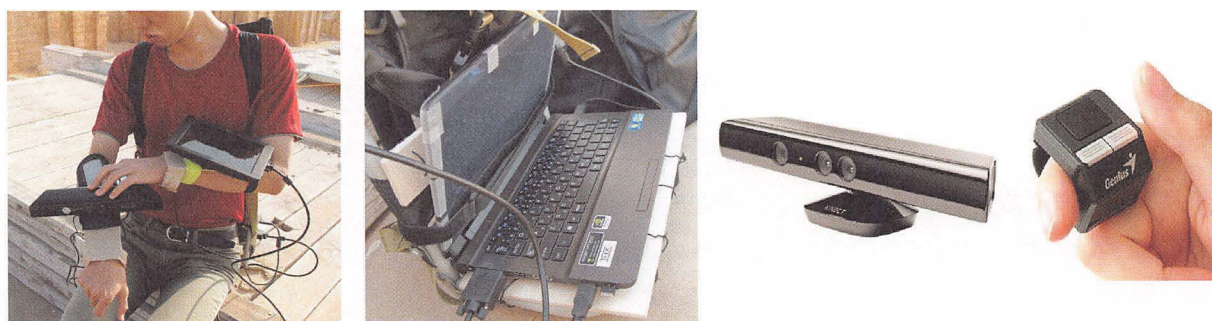


Fig. 10 装着型計測システムの要素：(左から) Kinect センサを右ひじに、液晶ディスプレイを左ひじに装着する様子、背中のキャリア上の PC、Kinect センサ本体、指輪型マウス

ノート PC には 64bit OS (1.4kg, 4CPU/2.30GHz, 512GB SSD, 16GB RAM) を使用し、メモリ容量が大きく点群データ処理に適したものを選定し、グラフィクスカードにはプログラマブルな環境 CUDA (Nvidia inc.) に対応した機種 (GeForce(R)GPU GT 650M) を利用することで、小型ながらもグラフィクスハードウェアによる並列処理が使える環境を用意した。形状計測のためのソフトウェア処理においては Newcombe ら<sup>[3]</sup> が提案しているアルゴリズムを利用し、そのデモ実装であるオープンソース<sup>[4]</sup> が動作する環境を予め PC に用意した。このアルゴリズムは、リアルタイムで取得される距離画像に対して、各微小面の向き (法線) の推定を行い、逐次得られる距離画像の姿勢変化を捉えることで、対象に対するカメラの動きを推定する。推定されたカメラの動きに基づいて距離画像を統合し、滑らかな面をもったモデルとして形状を生成する。

#### 4.3 データ処理経過

使用した計測用ソフトウェアの設計上は、1回の動作により、約 5 m 立方のエリア内の連続した形状を記録することができるが、PC のメモリや処理速度等による制約などにより、比較的狭い範囲ごとに記録する必要があった。計測者は、梯子上で Kinect センサの向きを連続的に変えて立抗の内壁の形状データを記録し、自身の体の向きや梯子上での位置を変えながら計測を重ねることで、立抗の内壁を網羅するように 100 以上の形状データを記録した。

各記録データは、データ収集後に位置合わせを行う必要があり、これは異なるデータにおいて同一箇所が含まれており、この部分の形状が一致するように互いの位置関係を調整する必要がある。この処理には、ICP (iterative closest points) アルゴリズムが一般に用いられる。本プロジェクトでも、オープンソースによる実装の meshlab<sup>[6]</sup> を用いて、手動にて事後処理でシャフトの全体の位置合わせを行った。Fig. 11 にその例を示す。梯子や送風ダクトなど、現地での運用に必要であるが、計測データとして不要な箇所は計測時に避けたり、動かしながら必要な壁面を逃さないよう計測を実施することができ、着用型のシステムを導入したことによって、計測の実施が実現できただけでなく、取得データそのものの性状にも有効性が見出された。



5 まとめ

本稿では、イドウトのmastabaの3次元デジタルアーカイブを作成するための現場での実地計測を遂行するために併用した、異なる計測アプローチについて述べた。現地の物理的な状況や、対象の性状に併せて、計測システムの形態や性能を選択し、必要に応じて独自にシステムを構成する手段を講じた。これにより、訪問した者が体感する現地ならではの構造や、巨視的・微視的な視点での対象の3次元情報を、包括的に取得し再現するための計測の実施方法と、得られたデータの結果について示した。

今後は、異なる専門家による異なる視点で、多重化が可能なコミュニケーション手段が可能となるようなネットワークメディアの枠組みとして、本稿での計測データに基づいた3次元情報の利用方法について提案し、情報システムとしてプロトタイプを示していく予定である。

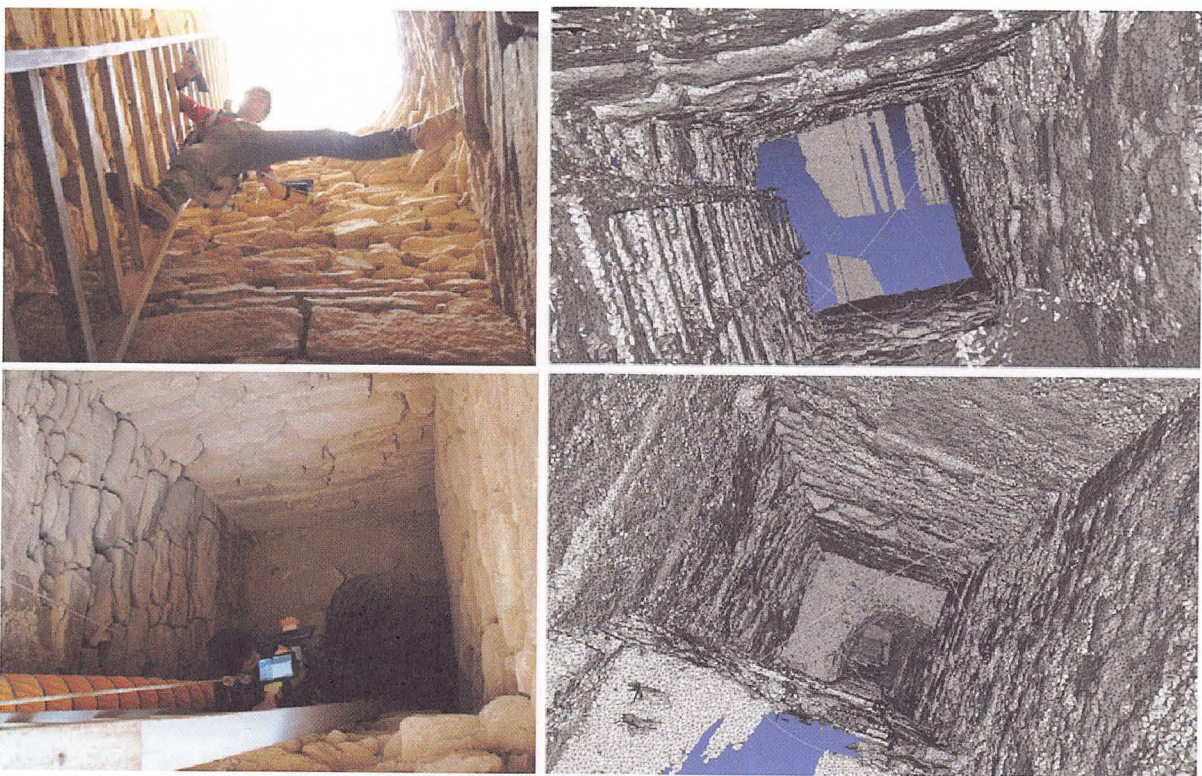


Fig. 11 装着型計測システムによる計測の様子（左列）と計測結果の例（右列）

謝辞

本研究は独立行政法人日本学術振興会の科研費（基盤研究（B）「古代エジプトの石造建築物文化財の保存と活用の研究—サッカラを例にして」研究課題番号：22401001）の助成を得た。

参考文献

- [1] 吹田浩, 「エジプト国イドゥートの地下埋葬室の修復 2005年～2009年」, 住友財団報告書, 2010.
- [2] N. Kanawati and M. AbderpRaziq, The Australian Centre for Egyptology: Reports19, THE UNIS CEMETERY AT SAQQARA, Vol. II, 2003.
- [3] Richard A. Newcombe, Shahram Izadi, Otmar Hilliges, David Molyneaux, David Kim, Andrew J. Davison, Pushmeet Kohli, Jamie Shotton, Steve Hodges, and Andrew Fitzgibbon, "KinectFusion: Real-Time Dense Surface Mapping and Tracking, " in IEEE *ISMAR*, pp. 127-136, 2011.
- [4] PCL; point cloud library: <http://pointclouds.org/documentation/tutorials/>
- [5] Besl, Paul J.; N.D. McKay, "A Method for Registration of 3-D Shapes," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society) 14 (2): 239, 1992.
- [6] Meshlab: <http://meshlab.sourceforge.net/> 3D-CoForm Project: <http://www.3d-coform.eu/Mark set>