

断片化したエジプト古代壁画の復元支援システム

中内 海輝¹ 角田 直嵩² 村岡 叶夢² 吹田 真理子³ 吹田 浩³ 鶴田 浩章¹ 肥後 時尚⁴ 末森 薫⁵ 安室 喜弘¹¹関西大学 環境都市工学部 ²関西大学大学院 理工学研究科³関西大学 文学部 ⁴筑波大学大学院 人間総合科学研究群 ⁵国立民族学博物館 学術研究開発センター

1 はじめに

イドゥートのマスタバ墓はエジプト・サッカラ遺跡に位置する紀元前 24 世紀の墓である。礼拝室や倉庫などの部屋からなる上部構造と地下埋葬室で構成されている。上部構造の下部約 12 mにつくられた地下埋葬室は岩体をくりぬいた空間であり(図 1), その壁面は泥土層および漆喰層を重ねてつくられた美しい彩色壁画が残存している。しかし, 壁画の劣化は顕著であり, 表面の修復や保全だけでなく, 剥落した多数の壁画片が収集され, 剥離が顕著なものは剥ぎ取って補強する処置が施された[1]。残存壁画面積も大きくはなく, 復元作業は容易でないが, 遺物は現場から持ち出せないため, 現場以外では, 剥落した壁画片や壁面の撮影画像から実物大に印刷した紙面を用いた復元作業が行われてきた。

本研究では, 埋葬室現場や壁画片の 3D 計測に基づいた 3 次元仮想空間を構築し, 復元作業の支援となる機能開発を目的とする。実物の遺物や現場環境の代替となる機能を考慮しつつ, 壁画片の立体形状を考慮した復元作業を支援するための操作性や, DX の効果について検討する。

2 先行研究

2022 年度に, イドゥートのマスタバ墓にて内部の様子を精査し, 壁面の母岩や残存壁画の状態や収集されている大量の壁画片を対象に, 3D データが取得された[2]。3D 計測には LiDAR (Light Detection And Ranging) センサ搭載の Apple 製 iPhone14 Pro を使用している。壁画片は非常に細かな断片まで含むと数千にも及ぶ。そのうち, 表面の顔料等の色情報に特徴が認められ, 形状の組み合わせを考慮ができるサイズのものを優先して数百点データ化した。壁画片 10 サンプル



図1 イドゥートのマスタバ墓の実測 3D モデル

について実寸と比較したところ, 壁画片表面上で 1mm 以内の誤差精度で実寸をもった図像データが得られた。現地から持ち出せない壁画片現物の代わりに 3D データを利用した復元作業の仮想化が試みられたが, マウスを使って破片を 3 次元で操作するには大きな課題があった[2]。

3 提案手法

本研究では, 固体の接触干渉などの物理シミュレーション機能を内包したゲームエンジン内に, 計測で得た壁面と壁画片の形状データを複数取り込み, 更に, 紙面に印刷した壁画片を, カメラに見せて入力することで, その位置や向き, 配置をリアルタイムにゲームエンジン内に再現するシステムを提案する。こうすることで, マウスや画面タッチによる物体操作よりも, 同時に操作できる対象を増やせる上に, 移動や回転を即座に反映可能となる。従来の作業でも使われていた実寸大の印刷紙面を用いれば, 壁画片の組み合わせや位置決め作業との親和性も高く, 3D データやソフトウェアに不慣れなユーザにも直感的に扱える。

そのために, 図 2 のようなシステムを構築する。まず, ゲームエンジン上では LiDAR で作成した壁画片と母岩の実寸を持った 3 次元データを使用する。このデータは編集の際に各壁面に分類, 属性付けを行い, 紙面の裏面にあるマーカと個別に紐づけをしている。次に, ユーザは透明な机上で壁画片の印刷紙面のパズルを行う。Web カメラは印刷紙面の裏面にあるマーカの中

Support system for restoration of fragmented ancient Egyptian mural
Kaiki Nakauchi¹, Naotaka Sumida², Tomu Muraoka², Mariko Suita³, Hiroshi Suita³, Hiroaki Tsuruta¹, Tokihisa Higo⁴, Kaoru Suemori⁵, Yoshihiro Yasumuro¹

¹Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, 3-3-35 Yamate, Suita, OSAKA, 564-8680, JAPAN

²Graduate School of Science and Engineering, Kansai University

³Department of Literature, Kansai University

⁴Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba

⁵Department of Advanced Human Sciences, National Museum of Ethnology

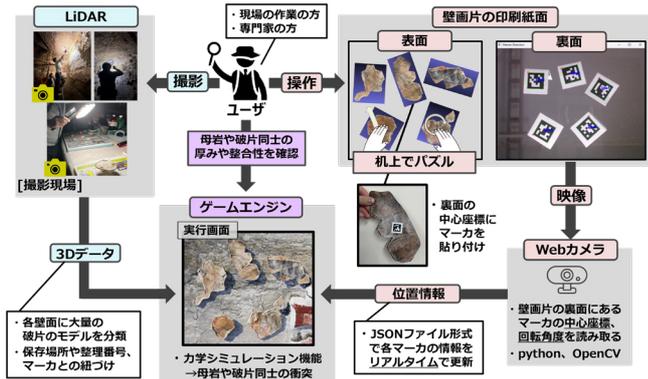


図2：提案システムの処理過程



図3：パズリング作業の様子

心座標，回転角度を読み取り，それら位置情報をゲームエンジン内にリアルタイムで反映する。これにより，机上でのパズルとゲームエンジンでの立体形状の確認を同時に行うことができる。

4 実装

本研究では，イドゥートのマスタバ墓の残存壁画の石膏レプリカを用意し，これを断片化して対象とし，先行研究[2]と同様に Apple 製 iPhone14 Pro の LiDAR を用いて取得した 3D モデルをゲームエンジン Unreal Engine5 (UE) 内で使用した。衝突判定と剛体力学を扱えるコリジョンと呼ばれる物理シミュレーション機能を適用することで，母岩や破片の形に応じて接触を再現でき，厚みや湾曲面の整合性を実行画面で確認できる。印刷紙面は 3D モデルの壁画片表面上を計測した値をもとに実寸で作成し，裏面に正方の AR マーカを付与した。マーカの識別と位置情報の取得には OpenCV を利用し，認識されたすべての破片のマーカ情報を JSON 形式で保存してリアルタイムで更新する。同一計算機上で UE を実行するとともに，ローカルに http サーバを立て，ゲームエンジンとの通信に利用する。尚，ゲームエンジン側では，壁画片の位置や回転に閾値を設け，一定以上の大きさの変化のみを更新し，UE の表示において細かな振動を起こすことを防いだ。図 3 に示すように透明なアクリル板の上でパズリング作業を行い，アクリル板の裏面をカメラ (Logicool C922n PRO HD1080p) で捉えて処理を行い，図 4 に示すように UE 内で復元試行を表示することができた。

5 考察

本研究では，ゲームエンジン内の物理シミュレーション機能と，印刷した壁画片の位置情報をカメラ入力することで，接触干渉を考慮した

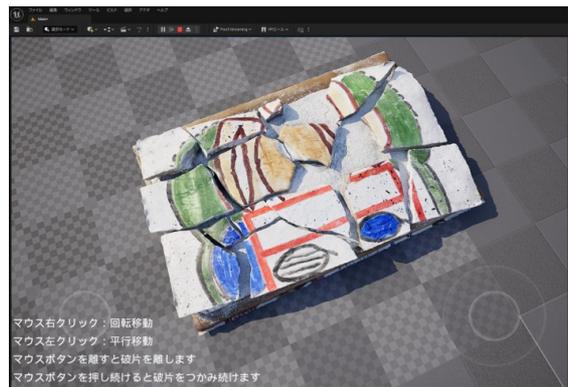


図4：ゲームエンジン実行画面

壁画の直感的な CG 復元機能を提案した。作業はすべて一度 JSON 形式でデータ化されていることから，作業ログを残して，いくつも試案を記録・再現・比較することも可能になるという DX の利点があると考えられる。現実装では，壁画の様子が作業時に見えないので，半透明アクリルを使って母岩像を投影する等の検討が必要である。

6 おわりに

本研究では，撮影画像による復元作業とゲームエンジンによる 3 次元仮想空間での復元作業を両立させ，紙面による直感的な操作性と破片の立体形状を考慮した復元作業を実現した。今後，開発したシステムに対して，現場の復元作業による評価を実施する予定である。

謝辞 本研究の一部は科研費補助金 (21H04366) および関西大学先端技術推進機構の支援を受けた。

参考文献

[1]吹田浩 他：エジプト・サッカー遺跡における関西大学の文化遺産保存修復プロジェクト，文化財保存修復学会第 45 回大会研究発表要旨集，2023
 [2]角田，村岡 他：ゲームエンジンを援用した壁画復元作業の支援～エジプト・サッカー遺跡イドゥートのマスタバ地下埋葬室でのケーススタディ～，文化財保存修復学会第 45 回大会研究発表要旨集，2023