



高松塚古墳のデジタル再現と理解支援のための MR システム

MR System for Digital Recreation and Understanding Support of Takamatsuzuka Kofun

宋文澤, 林武文

Wenze SONG, Takefumi HAYASHI

関西大学 総合情報学研究科 (〒569-1052 大阪府高槻市霊仙寺町 2 丁目 1-1, haya@kansai-u.ac.jp)

概要: 本研究では, 特別史跡の高松塚古墳とその石室壁画の理解支援を目的として, MR システムを開発した。体験者はハンドトラッキングを通じて, 直観的な操作感覚で壁画を鑑賞し, さらに懐中電灯のインタフェースを開発し, 体験者が発掘時の壁画と復元図を同時に観察し見比べることを可能にした。また, 天井にある壁画を鑑賞する際の身体負担を軽減する方法も提案した。

キーワード: 高松塚古墳, 展示支援, デジタルコンテンツ, 複合現実(Mixed Reality)

1. はじめに

デジタル造形技術の進歩により, 展示物を 3D 化してレプリカを作成し, 一般の人々が自由に触れたり, XR 技術を活用して直感的に観察できるようになったことで, 展示物の理解支援に大いに役立っている [1]。一方で, 史跡はその規模が大きいためデジタル化には困難が伴う上に, レプリカやデジタルコンテンツが作成されたとしても, 史跡の経年劣化の跡と建造当時の様子を同時に反映して見比べることは大きな挑戦が伴う。本研究で焦点を当てた高松塚古墳は, その一つの例として挙げられる。

高松塚古墳[2]は, 奈良県明日香村に位置する 7 世紀末から 8 世紀初頭の高松塚古墳である。関西大学と龍谷大学の研究者・学生グループによって発掘調査が行われ, 人物像, 四神図, 天空図, 星宿図からなる色彩豊かで精緻な壁画が発見されたが, 盗掘により貴重な副葬品の一部が持ち去られ, 大きな被害を受けている。特に, 北壁に描かれていた玄武の壁画では, 図 1(a)に示すように発掘当時すでに亀と蛇の顔部分が削り取られており, 本来南壁面に描かれていたと推定される朱雀の壁画は完全に失われていた。また, 盗掘により漆喰の保存状態も悪化している。関西大学の研究者ら[3]によって時代考証に基づいて色彩を復元した壁画は図 1(b)に示す。

本研究では, 高松塚古墳の 3D モデルを用いて, 経年劣化の跡と建造当時の様子を同時に反映させる新たな方法を提案し, 複合現実(MR)コンテンツの「懐中電灯」というインタフェースとして実装した。さらに, 石室の天井に描かれた星宿図を観察する際に, HMD (Head-Mounted Display)による身体負担を軽減する方法も提案した。本稿

では, 壁画の発掘時と復元図を見比べる手法, 身体負担の軽減およびその実現方法について詳述し, システムの有効性を検証するために実施した評価実験とアンケート調査の結果についても報告する。



(a) 発掘時

(b) 推定した建造時の復元図

図 1. 北壁に描かれていた玄武の壁画

2. 関連研究

2.1 古典籍・展示物とデジタルアーカイブとの融合

古典籍・展示物とデジタルアーカイブとの融合に関する既存研究は多数ある。

渡辺ら[4]は富山県の獅子舞の後継者不足を解消するために, ARToolkit を用いて獅子頭の 3D データベースを構築し, 仮想空間で体験できるデジタルアーカイブを作成した。Soga ら[5]は HMD(とペン型デバイスを使用し, ユーザがこれらのデバイスを通じて万年筆の 3DCG を鑑賞し, 対話するシステムを開発して博物館で運用した。一方, 本研究では, 特別なコントローラを使用せず, 体験者はジェスチャによって石室の壁画を観察するシステムを開発した。また, これらの展示物より遥かに大きな特別史跡を研究対象とし, 体験者が MR で本来入れない狭い空間に入って鑑賞できるようにした。

2.2 高松塚古墳のデジタルコンテンツに関する先行研究

奥村ら[6]は、手動モデリングの手法を用いて高松塚古墳を3DCG化し、VRコンテンツとして実装し、コントローラで古墳の壁画の状態を発掘時と建造時の間に切り替えることを可能にした。

林ら[7]は、コロナ禍で現地に足を運べない問題を解消するため、高松塚古墳のWebベースの簡易システムを開発し、体験者が自宅でもブラウザを通してWebやVRで古墳の壁画を見られるようにした。ただし、これらのシステムは、古墳の寸法を直感的に把握できないことが課題となった。その対策として、石田ら[8]は石室入り口の実物大レプリカと拡張現実(AR)技術を用いることにより、古墳の寸法を直感的に把握できると同時に、発掘時の状況と復元図を同時に観察することを可能にした。ただ、タブレットに依存するコンテンツであったため、体験時に両手で重いタブレットを握る必要があり、臨場感に欠けていた。そこで、本研究では、MR技術とハンドトラッキングを使用することで、体験者が高松塚古墳の寸法を意識しながら壁画の鑑賞を可能とした。また、ジェスチャでインタフェースを制御することにより、コントローラやタブレットなどの入力デバイスも不要とした。

3. MRシステム

3.1 ユーザ入力

本研究では、Meta Quest 3の内蔵機能であるハンドトラッキングを使用し、体験者の手をMR空間でハンドモデルとして反映させた。そのうち、図2に示すように、ハンドモデルの両手の人差し指の指先に小さな球体をトリガーとして設置した。このようにすることで、指先が他のトリガー設定されたオブジェクトに触れると、触れたオブジェクトによって異なる指示を行うことができる。例えば、指先のトリガーが壁画範囲にあるトリガーと触れると、壁画の音声解説が流れるように設計されている。

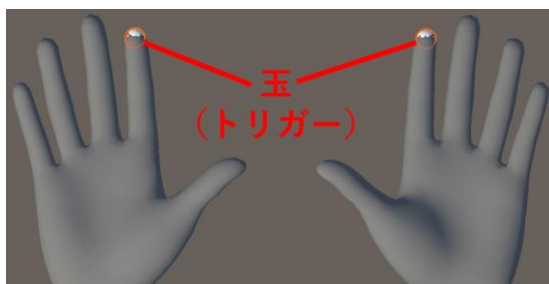


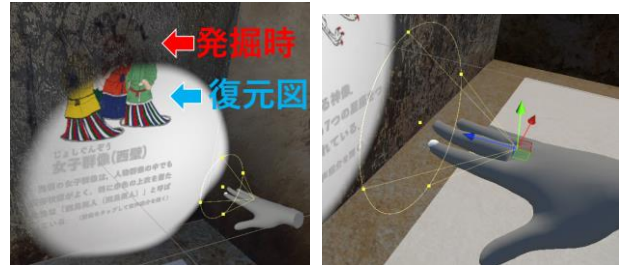
図2. 指先のトリガー

3.2 懐中電灯

発掘時の壁画と復元図を同時に見比べるための「懐中電灯」ユーザインタフェースを開発した。図3(a)に示すように、体験者の右手の人差し指から懐中電灯のようなスポットライトが投射され、その光が発掘時の石室に当たる範囲のみ復元図を表示するように設計された。この機能は、発掘時の石室モデルの内側に透明な復元モデルを重ね、光が当たっている範囲の透明度を高くすることで実現され

た。

懐中電灯の光源について、人差し指の指先が指している方向に投射するが、光源が指先に付けられると、ユーザの手の姿勢や手部トラッキングの不安定さなどの原因で、射出される光が乱れる可能性がある。そのため、光線が乱れずに、かつ右手の人差し指の方向に射出されるようにするために、最終的には図3のように、光源オブジェクトを右手の人差し指の指の間に設定することに決定した。



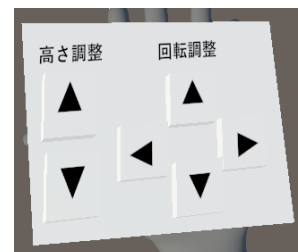
(a) 壁画の復元図と同時に鑑賞 (b) 懐中電灯の位置

図3. 懐中電灯インタフェース

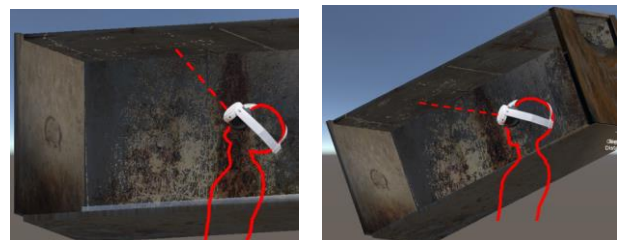
3.3 星宿図と高さ・回転角度の調整

石室の天井には星宿図[9]が描かれており、これは100以上の星が金箔で表現され、28の星宿が朱線で結ばれている。しかし、HMDを装着して天井を見ることは非常に身体に負担がかかる。その対策として、ユーザが体験中に随時古墳の回転角度と高さを調整できるインタフェースを設計した。さらに、石室の天井が低いため、立ったままでは見ることが難しい。このため、石室全体を上下に移動させることで、無理なく観察できるようにした。

図4(a)のように、ユーザの左手の掌に古墳の高さと回転角度を調整するためのパネルがあり、右手の人差し指でボタンをタップすることで自由に古墳を調整できる。これは、3.1節に述べたトリガーを使用して実現した。回転前と回転後の鑑賞イメージは図4(b)と(c)に示す。



(a) 壁画の復元図と同時に鑑賞



(b) 回転前のイメージ (c) 回転後のイメージ

図4. 星宿図の鑑賞

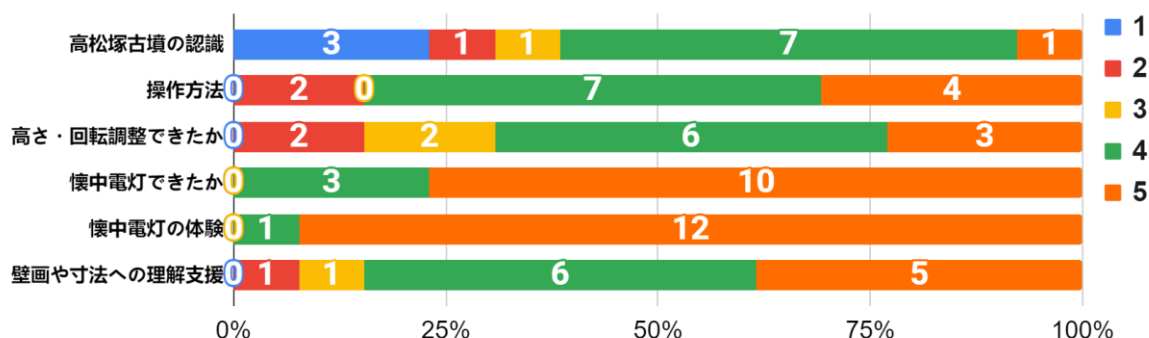


図 5. アンケート結果

4. 評価実験

本研究のコンテンツの有用性を検証するため、評価実験を行った。学部3年生から大学院生まで、合計14人がコンテンツを体験し、アンケートに回答した。アンケートには「高松塚古墳の認知度」、「インタフェースの操作性」、「コンテンツの教育効果」などについて5段階評価を行った（5の評価が最高である）。

評価の結果は図5からわかるように、全体的に高評価が得られており、特に「懐中電灯の体験」や「操作方法のわかりやすさ」においては、多くの参加者が5段階評価で高得点を付けていることが分かる。これにより、本研究のコンテンツがユーザビリティと教育効果において有用であることが確認できた。

一方で、「高さ・回転調整できたか」の項目では、若干点数が低くなっている。具体的には、この項目では4名が1～3の評価を付けた。これらの結果から、この機能についてさらに改善の余地があることが示唆される。特に、高さ・回転調整機能の使い方に関するサポートを強化することが今後の課題として挙げられる。

評価実験を行う際に発見したこととして、体験者がゆっくり壁画を見比べながら理解を深めることを想定していたが、HMDの未経験者の中にはMRを体験すること自体が目的となってしまう、壁画の理解に至らなかったケースが見受けられた。このように体験の目的が異なることでフィードバックが異なり、MR体験者の方が体験時間が遥かに短い傾向があった。さらに、体験者が公共の場で他人に見られていることを意識してしまい、壁画の鑑賞に集中できないケースも存在した。体験の目的が違うことでフィードバックが異なることが見られたため、これからアンケートの回収数を拡大することでこの問題がさらに顕著になると考えられ、回答データの分析には新たな挑戦と課題が生じる。

5. おわりに

本研究では、複合現実（MR）技術とハンドトラッキングを活用して、高松塚古墳の石室内の3Dモデルを構築し、体験者が古墳の寸法や壁画の状態を直感的に理解できるインターフェースを開発した。特に、懐中電灯機能や操作方法のわかりやすさにおいて高い評価を受けている。

一方、以下の点については今後の課題として挙げられる。

① 高さ・回転調整機能の改善

現在のシステムでは高さ・回転調整機能に関する評価が若干低く、この機能をさらに使いやすくする必要が示された。

② アンケートの実施数拡大とデータ分析方法の改良

今回はアンケートを14件集めたが、この数ではシステムの有効性の検証に不十分であり、回収数を増やして再度分析する必要がある。さらに、体験目的の違いで生じた回答結果の差異や、公共の場で集中しにくいことに対する対策を考えることも必要である。

参考文献

- [1] 倉島治, 森健人: 6. 3Dモデルによる博物館リソース可搬性の向上, 写真測量とリモートセンシング, Vol.60, No.3, pp.111-117 (2021)
- [2] 「高松塚古墳 | 国営飛鳥歴史公園」, <https://www.asuka-park.jp/area/takamatsuzuka/tumulus/> (2024/07/06)
- [3] 「高松塚古墳壁画再現展示室 | 関西大学博物館」, <https://www.kansai-u.ac.jp/Museum/kohun> (2024/07/06)
- [4] 渡辺祐也, 中山智博, 辻合秀一: 「獅子頭のARデジタルアーカイブー富山の獅子頭の3Dデータベース方法の構築ー」, インタラクシオン2014論文集, C1-3, pp.583-586 (2014)
- [5] Asako Soga, Takuzi Suzuki: “VR Appreciation System for Fountain Pens and Analysis of User Behaviors in Museum Exhibition”, “Design, User Experience, and Usability. Design for Contemporary Interactive Environments (HCI 2020)”, Vol.12201, pp.532-541, https://doi.org/10.1007/978-3-030-49760-6_38 (2020)
- [6] 奥村茜, 寺田楽, 林武文: 「高松塚古墳VR体験コンテンツの開発」, 関西大学なにわ大阪研究センター紀要, Vol.3, No.1, pp.9-21 (2021)
- [7] 林武文, 石田考毅, 奥村茜: 「高松塚古墳VRコンテンツー発掘50周年に向けたコンテンツ開発ー」, 電気学会電子・情報・システム部門 知覚情報研究会資

料, Vol.PI-22, No.34, pp.25-30 (2022)

- [8] 石田考毅, 林武文: 「拡張現実感を活用した高松塚古墳石室の情報呈示の研究」, 電気学会 電子・情報・システム部門 知覚情報研究会資料, Vol.PI-23, No.95, pp.57-60. (2023)
- [9] 「高松塚古墳星宿図の南北逆転復元図」, <https://www.kotenmon.com/str/takamatsuduka/takamatsuduka.html> (2024/07/06)