

## バーチャル飛鳥京： 複合現実感技術による遺跡の復元

角田 哲也<sup>1</sup> 大石 岳史<sup>2</sup> 池内 克史<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> 東京大学大学院情報学環・学際情報学府 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

<sup>2</sup> 東京大学生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1-Ee405

E-mail: <sup>1,2,3</sup>{kakuta, oishi, ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

**あらまし** バーチャル飛鳥京は複合現実感(MR: Mixed Reality)技術により、古代の飛鳥京の復元 CG 映像を現在の明日香村の景観に合成することを目的とした MR コンテンツである。本コンテンツは、影付け平面と基礎画像を用いた実時間ソフトシャドウ表現法を利用して実光源環境に応じた仮想物体の陰影を高速に生成し、ユーザに対して違和感のない合成画像が生成できることを特色とする。本コンテンツを明日香村現地で一般公開し、体験者に対してアンケート調査を実施することによってシステムに対する主観評価を行い、コンテンツの有用性を確認した。

**キーワード** 複合現実感, 文化財, 光学的整合性

## Virtual Asukakyo: A Restoration of an Archeological Site with Mixed Reality Technology

Tetsuya KAKUTA<sup>1</sup> Takeshi OISHI<sup>2</sup> and Katsushi IKEUCHI<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Interfaculty Initiative in Information Studies & Graduate School of Interdisciplinary Information Studies,  
The University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

<sup>2</sup> Institute of Industrial Science The University of Tokyo 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

E-mail: <sup>1,2,3</sup>{kakuta, oishi, ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** This paper introduces the Virtual Asukakyo project, which intends to restore the ancient capital of Asukakyo to its original state using Mixed Reality. We reconstructed the lost buildings of Asukakyo with CG and synthesized them with the real landscape of Asuka Village. To improve the quality of the synthesized image, we worked on the problem of the photometric consistency in MR using fast shading and shadowing method based on shadowing plane and pre-rendered basis images. The system was opened to public in 2005 and 2006, and questionnaire surveys were carried out to evaluate the shadowing method and MR-system.

**Keyword** Mixed Reality, Cultural Heritage, Photometric Consistency

### 1. はじめに

近年、複合現実感 (MR: Mixed Reality) 技術を用いて失われた文化財をデジタル的に復元する試みが行われている(図 1)。MR では HMD (Head-Mounted Display) などを用いて、現実世界と Computer Graphics (CG) を実時間で重ね合わせて表示することが可能となっている[1][2]。この技術により CG で描いた文化財があたかも現実世界に出現したかのように見せることができる。

MR 技術を用いた文化財の復元には以下の 3 つの利点がある。

1. 遺構上に復元モデルを表示することが可能
2. 復元案の修正・変更が容易
3. 文化財の保存と活用を両立

第 1 に復元した CG モデルを遺構上に合成表示する

ことによって遺跡の現状と復元状態をわかりやすく対比することができる。またユーザを外界から遮断せずに、実世界の環境情報をそのまま利用することが可能である。そのため視覚的・聴覚的な感覚や現場の雰囲気など、従来の VR (Virtual Reality) コンテンツでは味わえない臨場感を体験することができる。

第 2 に CG モデルの修正・変更を容易に行うことができる。発掘調査の進展から復元案の修正が生じた場合、実物や復元模型を部分的に修正することは困難である。しかし MR では CG モデルの修正や差し替えを容易に行うことが可能である。

第 3 に遺跡の保存と活用という 2 つの要求に同時に応えることができる。一般に考古学的見地からは発見された遺跡は現状保存が原則と考えられている。しかし観光振興の観点から文化財の整備や活用を求められ



図 1. MR 技術による遺跡の復元イメージ

る場合も多い。MR では実世界の遺跡に影響を与えることなく効果的な活用も可能となる。

本研究では、奈良県明日香村に位置する飛鳥京跡の当時の姿を CG で復元し、MR システムを用いて現在の景観上に合成表示する飛鳥京 MR コンテンツを提案する。飛鳥京は 6 世紀末から 7 世紀末に諸天皇の宮殿が置かれた都の総称である。しかし 694 年の藤原京遷都以来、当時の面影は残されていない (図 2)。本コンテンツの特色は、影付け平面と基礎画像を用いたソフトシャドウ実時間表現手法を利用し、実環境光源と仮想世界の光源環境の整合性の向上を図った点にある。また本研究では、明日香村現地にてコンテンツの一般公開を行い、体験者に対するアンケート調査によりコンテンツの評価を行った。

## 2. 関連研究

CG を用いて文化財をデジタル的に復元する取り組みはこれまでも広く行われている[3][4]。これらの研究では図面などから 3 次元 CG モデルを復元し、CG アニメーションや、VR 技術を用いたインタラクティブな展示によって失われた文化財の過去の様子を再現している。このようなデジタル復元は従来の模型やレプリカに代わる表示方法としても注目されている。

しかし一般に CG アニメーション、VR による文化財の復元には鑑賞条件の制約や臨場感に欠けるといった問題がある。CG コンテンツは PC のディスプレイ上や特殊な VR シアターでしか鑑賞することができない。つまり鑑賞する場所は博物館のような限られた施設内に限定されてしまう。また実世界の景観情報を 3 次元 CG モデルによって完全に表現することは困難である。そのため臨場感や現実感に乏しいといった問題もある。

そこで屋外環境において MR システムを用いて文化財を表示する試みが行われるようになってきている。



図 2. 甘檜丘展望台から見た飛鳥京跡

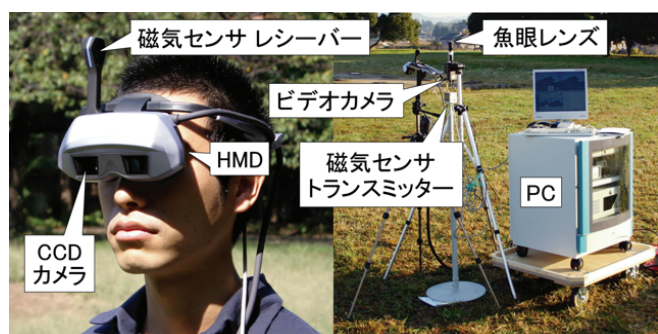


図 3. MR システムの外観

天目らは平城宮跡において、ウェアラブルコンピュータ、PDA、携帯電話などのモバイル端末を用いた表示・ナビゲーションシステムを提案している[5]。また古代ギリシアのオリンピア遺跡の復元[6]や、ポンペイ遺跡のフレスコ画に描かれた古代の生活を再現した事例[7]などもある。

ただしこれらの研究では実光源環境と仮想物体の光源環境の整合性は考慮されていない。MR において実世界と仮想世界の違和感のない合成を行うためには、幾何学的整合性、光学的整合性、時間的整合性という 3 つの問題を解決する必要がある。特に現実感の高い合成画像を生成するためには、光学的整合性を実現することが重要である。光学的整合性を実現するためには、実画像と仮想物体の色・明るさ・陰影といった条件を一致させる必要がある。特に屋外においては太陽の運動や天候の変化により光源環境が刻々と変化していくため、その変化に対応して仮想物体の陰影を実時間で変化させなければならない。

仮想物体の陰影付けに関してはこれまでも様々な手法が提案されている。Jacobs らは MR における照明手法についてまとめているが、屋外での光源環境の変化に実時間で対応できる手法は提案されていない[8]。佐藤らは予め生成しておいた仮想物体の影画像（基礎画像）を用いて、実光源環境に対応した仮想物体のソフトシャドウを高速に生成する手法を提案している[9]。しかしこの手法は画像ベースの手法であるためユーザの視点移動に対応することができない。一方、影付け平面という概念を用いて任意の視点において実時間で実行可能な影付け手法も提案されている[10]。

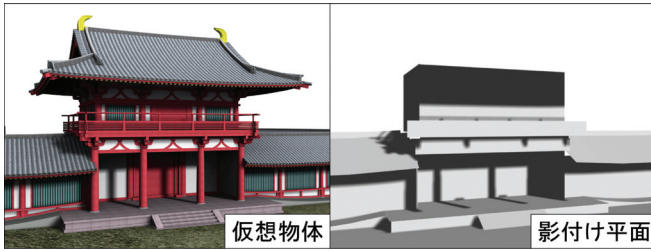


図 4. 影付け平面

本研究では実世界と仮想世界の光学的整合性を実現するために[10]の陰影表現手法を用いる。この手法は静的な物体にのみ適用可能であるが、本研究が対象とするような建築物の3次元モデルには適している。この手法により従来のMRアプリケーションに比べて違和感のない合成画像を生成することが可能である。

### 3. MR システム

本章では、基本システムであるMR Platformと陰影付け処理、遮蔽処理などの詳細について説明する。

#### 3.1. 基本システム

基本となるMRシステムには、キャノン社のMR Platform[11]を用いた。MR Platformはビデオシースルー方式のHMD、Polhemus社の6自由度磁気センサFASTRAKによって構成される。このシステムでは、実画像の取得、実世界と仮想物体の幾何学的位置合わせ、実画像と仮想物体の合成処理が可能である。MRシステムの外観を図3に示す。

#### 3.2. 陰影付け

本研究で用いた影付け平面と基礎画像による陰影表現手法について説明する。

##### 前処理

実世界の光源環境を半球状の面光源と仮定し、その面光源を  $n$  個の平行光源  $L_i (i=1,2,\dots,n)$  の集合に近似する。ここで、 $m$  枚の影付け面と呼ぶ平面形状のオブジェクト  $P_j (j=1,2,\dots,m)$  を仮想物体の表面上に配置しておく(図4)。そして、各々の平行光源を用いて仮想物体を描画し、影付け平面に落ちる仮想物体の影を基礎画像  $I_{b_{ji}} (j=1,2,\dots,m, i=1,2,\dots,n)$  として取得する(図5)。このようにして生成した近似光源数( $n$ ) $\times$ 影付け平面数( $m$ )の基礎画像を用いて任意の光源環境下における仮想物体の影を合成する。

##### 合成処理

天空の光源情報を取得するために、魚眼レンズを装着したカメラで全方位画像を撮影する。そして撮影した全方位画像から実世界の光源分布を計測し、各方向の光源強度を表す輝度パラメータ  $S_i (i=1,2,\dots,n)$  を求める。取得した輝度パラメータからは、仮想世界にあらかじめ配置しておいた仮想光源の強度が求められる。

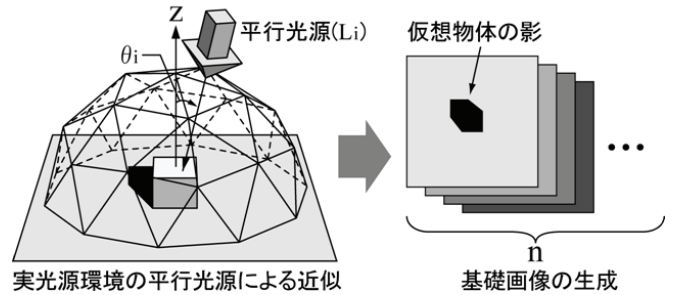


図 5. 基礎画像の生成

この光源分布によって、仮想物体表面の陰を実世界の光源環境に一致させることができる。さらに前処理で生成した基礎画像  $I_{b_{ji}}$  と輝度パラメータ  $S_j$  の線形和を計算し、入力された実光源環境に対応する仮想物体の影画像を生成する。この影画像を各々の影付け平面にマッピングすることにより、仮想物体のセルフシャドウと実画像に落ちる影を表現する。基礎画像と輝度パラメータの合成はGPU (Graphics Processing Unit) のシェーダー機能を用いて高速に計算することが可能である。

### 4. 飛鳥京 MR コンテンツ

本章では、飛鳥京MRコンテンツの制作過程について説明する。本研究では復元対象として、浄御原宮を中心とした飛鳥京跡と国指定史跡川原寺跡を選択した。

#### 4.1. 川原寺モデルの作成

川原寺モデルの作成は3dsmax™を使用して手作業で行った。復元モデルについては、奈良文化財研究所より提供を受けた復元図面を参照した。しかしこの復元図面は模型制作用のものであるため、建物細部の情報が得られなかった。そこで、細部に関しては創建年代の近いと考えられる法隆寺を参照した。モデルの色彩については平城宮跡に復元された朱雀門を参考にした。図6に川原寺の復元CGモデルを示す。

#### 4.2. 飛鳥京モデルの自動生成

飛鳥京モデルの作成にあたっては、奈良文化財研究所及び橿原考古学研究所から提供を受けた復元図面を参照した。復元対象は甘檜丘展望台から眺めることのできる、石神遺跡、飛鳥寺、浄御原宮、飛鳥苑池遺構を含む範囲とした。浄御原宮の正殿及びエビノコ郭については川原寺と同様に手作業で行った。

ただし、多くの建物を含む飛鳥京のモデリングをすべて手作業で行うことは困難である。今回、復元の対象とした範囲には250棟以上の建物が存在し、その大部分は切妻屋根の平屋建てで、単純な形状をしている。また各建物は甘檜丘展望台から200メートル以上遠方に表示されるため、画面上で確認できないような細部の表現は不必要である。



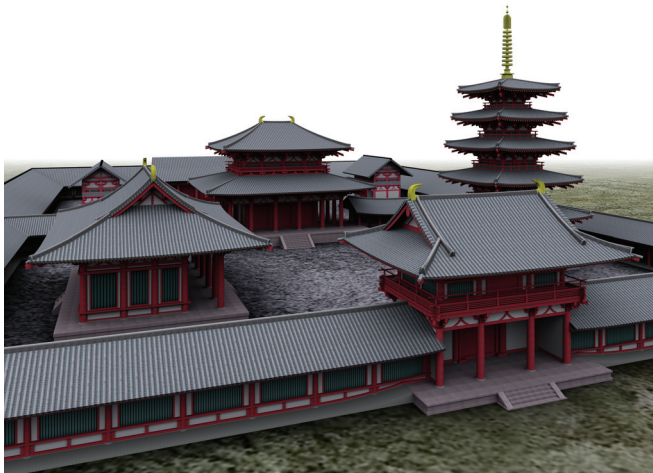


図 6. 川原寺復元 CG モデル



図 7. 飛鳥京復元 CG モデル

そこで本研究では、モデリング作業の効率化を図るため、飛鳥京において比較的形状の単純な建物の幾何形状とテクスチャ座標を自動生成するスクリプトを開発した。近年、建築物や都市の CG モデルを自動的に生成する手法が提案されているが[12][13]、これらの手法を複雑な形状をもつ我が国の古建築に適用することは難しい。しかし本スクリプトでは、予め用意してある建物の基本形状に梁行や桁行などの主要な寸法を入力することによって、任意の大きさの建物モデルを生成することができる。また、個々の建物の配置図上の座標を入力することによって、生成した建物モデルをシーン内の任意の位置に自動的に配置することができる。これによって、復元図面から計測した個々の建物の寸法と配置座標を入力するだけで、飛鳥京の 250 棟以上の建物モデルを数秒で生成することが可能となった。図 7 に飛鳥京の復元 CG モデルを示す。なお実験に用いた飛鳥京モデルのポリゴン数は約 96000、川原寺モデルのポリゴン数は約 388000 であった。



図 8. 古代の人物と川原寺鳥瞰視点画像



図 9. 明日香村での公開実験の様子

## 5. 公開実験

2005 年 11 月 3,4,5 日と 2006 年 11 月 3,4,5 日の 2 回に渡って、明日香村現地にてシステムの公開実験を行った。公開実験は「バーチャル飛鳥京[14]」というイベント形式で実施し、一般の参加者を募った。参加者には HMD とハンドヘルド型の表示装置を用いて、復元モデルを明日香村の景観に合成した画像を見てもらった。また体験後にアンケートに回答してもらった。

### 5.1. 実験内容

実験では飛鳥京及び川原寺の復元モデルを実世界の遺構上に実寸大で合成表示した。2006 年度の実験では、前年のアンケート結果を踏まえ、川原寺において人物モデルの表示と俯瞰視点での寺院全体の表示も行った (図 8)。

また、甘樫丘展望台から見た飛鳥京モデルは遠方に表示されて細部が見にくいという問題があったため、合成画像を任意の倍率でズームする機能を追加した。CG 画像については仮想カメラの焦点距離を調整し、実画像については HMD の搭載カメラから撮影した画像をデジタルズームすることで拡大表示した。

実験に用いた PC の仕様は、CPU: Core2Duo 2.4GHz, RAM: 2GB, GPU: nVIDIA GeForce7950GT である。実光源環境の撮影には魚眼レンズ (フジノン社 YV.2X1.4A-2) を装着した CCD カメラ (Point Grey Research 社 Dragonfly2) を使用した。

実験の参加者には、展示スタッフによるコンテンツ



図 10. 合成画像(甘樫丘から見た飛鳥京)

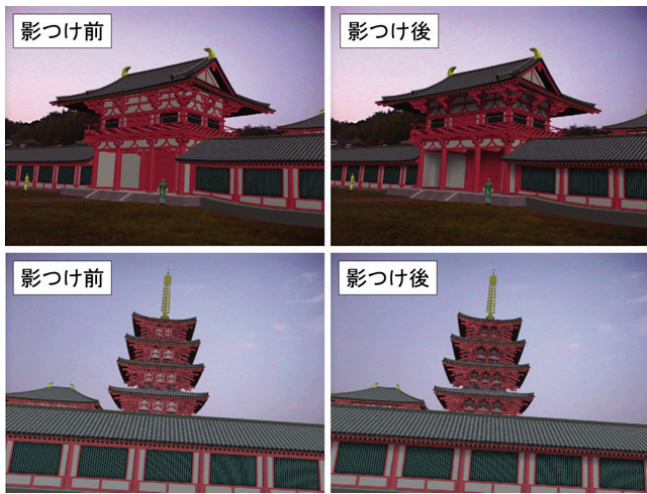


図 11. 合成画像(川原寺)

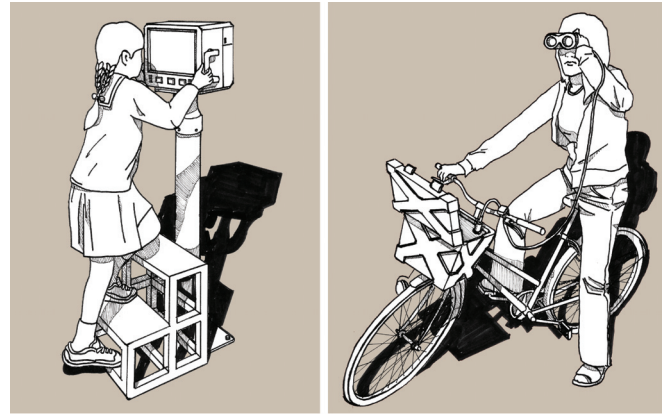
の説明を聞きながら、合成画像を見てもらった。体験時間は1人あたり30秒から3分程度であった。実験は10:00から15:00の間に行い、太陽の移動や天候の変化によって仮想物体の陰影が変化する様子を観察してもらった。合成画像の体験後、影付けの効果や表示装置の使用感に関するアンケートに回答してもらった。公開実験の様子を図9に示す。また実験で生成した合成画像を図10, 11に示す。

## 5.2. アンケートによる評価

公開実験の参加者に対して実施したアンケート調査の結果について述べる。2005, 2006年度の有効回答数、男女比率、平均年齢を表1に示す。アンケートでは6問の質問を用意し、回答者にはそれぞれの質問について5段階の評価を行ってもらった。また展示内容について自由に意見と感想を記述してもらった。各質問の内容と2006年度の集計結果を図13に示す。さらに自由回答のなかで特に多かった意見を以下に示す。

### 技術的な問題に関する意見

- ・ 自由に動けるようにしてほしい。
- ・ CGが作り物のように見える。風景から浮いて見える。



望遠鏡型ディスプレイ

双眼鏡型ディスプレイ

図 12. MRディスプレイの提案

実施年度	有効回答数	男女比率	平均年齢
2005年	359	男:179, 女:179	48.7
2006年	924	男:442, 女:478	47.4

表 1. アンケート回答者の構成

- ・ 頭を動かすとCGがずれる。
- ・ ゴーグルに違和感がある。顔や目にフィットしない。
- ・ 複数人で体験できるようにしてほしい。
- ・ 解像度・色数をもっと上げてほしい。
- ・ 建物と風景の明るさが違う。CGの色が鮮やか過ぎる。

### コンテンツに関する意見

- ・ 他の遺跡にも適用してほしい(藤原京, 石舞台古墳等)。
- ・ 見える範囲を広げてほしい。
- ・ 門が開いて中に入れるとよい。
- ・ 建物内部の構造も見られたらよい。
- ・ モヤに合わせてCGが変化するとよい。
- ・ 音声解説があるとよい。
- ・ ソフトやCGデータをDVDで販売してほしい。

### 展示方法に関する意見

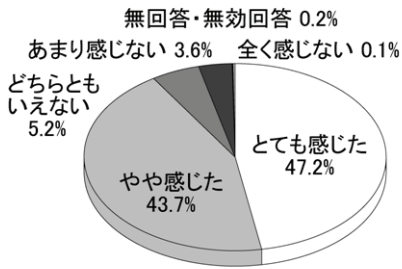
- ・ 展示の回数を増やしてほしい。常設してほしい。
- ・ 機材の台数を増やしてほしい。待ち時間が長い。
- ・ 画像をプリントアウトして持ち帰りたい。
- ・ 大画面で見られるとよい。

図13, Q2より、87.8%の回答者が仮想物体の陰影表現を行なうことによる合成画像の現実感の向上を認めている。またQ4における表示装置の違和感を解消するためには、図12に提案するような頭部装着型以外のディスプレイを検討する必要があるといえる。

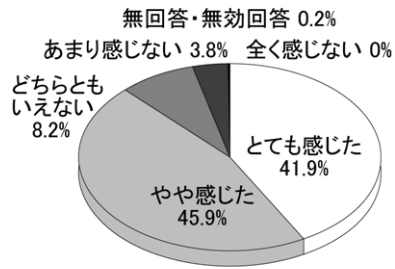
## 6. まとめ

本研究では、仮想物体の高速陰影表現手法を用いた飛鳥京MRコンテンツを提案した。本コンテンツでは、飛鳥京及び川原寺の復元CGモデルを制作し、MRシステムによって現地での一般公開を行った。さらに、影付け平面と基礎画像を用いた仮想物体の陰影表現法を適用し、合成画像の現実感を向上させた。公開実験の参加者に対してアンケート調査を実施した結果、陰影表現の効果とコンテンツの有用性を確認することができた。今後の展望としては、屋外環境における位置合わせ、HMDの違和感などを解決していく必要がある。

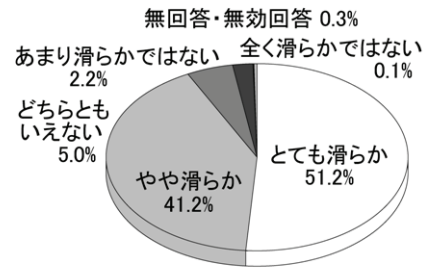




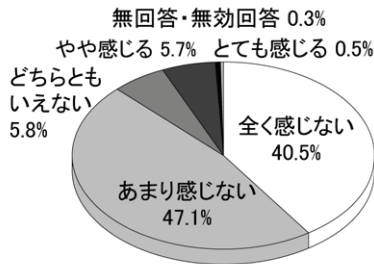
Q1. CGIによって復元された飛鳥京・川原寺をご覧になって、現実感・臨場感を感じましたか？



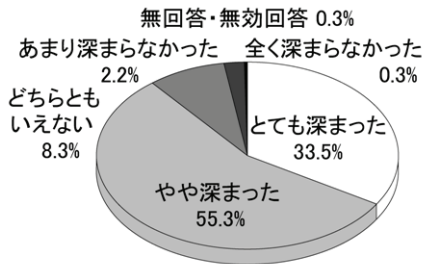
Q2. CGに影をつけることによって、現実感・臨場感の向上を感じましたか？



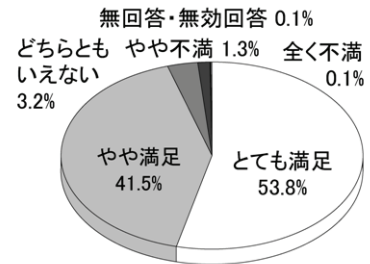
Q3. 視点を動かしたときに、CGの動きは滑らかでしたか？



Q4. 映像ディスプレイ装置を使用するとき、違和感や不快感を感じましたか？



Q5. 今回の展示を体験することによって、飛鳥京・川原寺に対する理解が深まりましたか？



Q6. 今回の展示に満足されましたか？

図 13. アンケート結果

## 謝辞

本研究の一部は、文部科学省技術振興調整費リーディングプロジェクト「大型有形・無形文化財の高精度デジタル化ソフトウェアの開発」の援助を受けて行った。また、明日香村での一般公開については国土交通省の援助を受けて行った。実験の場を与えて下さった明日香村役場、復元図面をご提供いただいた奈良文化財研究所、橿原考古学研究所に対して謝意を表す。

## 文献

- [1] R. Azuma : “A Survey of Augmented Reality”, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, vol.6, no.4, pp.355-385(Aug. 1997)
- [2] R. Azuma, Y. Bailiot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre : “Recent Advances in Augmented Reality”, IEEE Computer Graphics and Applications, vol.21, no.6, pp.34-47(Nov. 2001)
- [3] 安藤真, 吉田和弘, 谷川智洋, 王燕康, 山下淳, 葛岡英明, 廣瀬通孝: “スケーラブル VR システムを用いた教育用コンテンツの試作-マヤ文明コパン遺跡における歴史学習-”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.8, no.1, pp.65-74(2003)
- [4] 大石岳史, 増田智仁, 倉爪亮, 池内克史: “創建期奈良大仏及び大仏殿のデジタル復元”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.10, no.3, pp.429-436(2005).
- [5] 天目隆平, 神原誠之, 横矢直和: “「平城宮跡ナビ」マルチメディアコンテンツを利用したモバイル型観光案内システム”, 第1回デジタルコンテンツシンポジウム, no.S3-6, (May. 2005)
- [6] V. Vlahakis, N. Ioannidis, J. Karigiannis, M. Tsotros, M.I Gounaris, D. Stricker, T. Gleue, P. Daehne and L. Almeida : “Archeoguide: An Augmented Reality

Guide for Archaeological Sites”, IEEE Computer Graphics and Applications, vol.22, no.5, pp.52-60(Sep. 2002)

- [7] G. Papagiannakis, S. Schertenleib, B. O’Kennedy, M. Arevalo-Poizat, N. Magnenat-Thalmann, A. Stoddart and D. Thalmann : “Mixing virtual and real scenes in the site of ancient Pompeii”, Computer Animation and Virtual Worlds, vol.16, no.1, pp.11-24(Feb. 2005)
- [8] K. Jacobs and C. Loscos : “Classification of illumination methods for mixed reality”, Proc. Eurographics State of the Art Report(STAR), pp.95-118(Sept. 2004)
- [9] 佐藤いまり, 林田守広, 甲斐郁代, 佐藤洋一, 池内克史: “実光源環境下での画像生成: 基礎画像の線形和による高速レンダリング手法”, 電子情報通信学会論文誌, vol.J-84-D-2, no.8, pp.1864-1872 (Aug. 2001)
- [10] T. Kakuta, T. Oishi and K. Ikeuchi : “Shading and shadowing of architecture in mixed reality”, Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR05), pp.200-201(Oct. 2005)
- [11] S. Uchiyama, K. Takemoto, K. Satoh, H. Yamamoto, and H. Tamura : “MR platform: a basic body on which mixed reality applications are built”, Proc. IEEE and ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR02), pp.246-253(Sept. 2002)
- [12] P. Wonka, M. Wimmer, F. Sillion, and W. Ribarsky : “Instant architecture”, Proc. SIGGRAPH’03, pp.669-677(Jul. 2003)
- [13] P. Müller, P. Wonka, S. Haegler, A. Ulmer, and L. V. Gool : “Procedural modeling of buildings”, Proc. SIGGRAPH’06, pp.614-623 (Jul. 2006)
- [14] バーチャル飛鳥京ウェブサイト : <http://www.cvl.iis.u-tokyo.ac.jp/~kakuta/virtual-asukakyo/>