

# 高速陰影表現手法を用いた飛鳥京 MR コンテンツの開発とその評価

Development and Evaluation of Asuka-Kyo MR Contents with Fast Shading and Shadowing

角田 哲也<sup>†</sup>, 大石 岳史<sup>††</sup>, 正会員 池内 克史<sup>††</sup>

Tetsuya Kakuta<sup>†</sup>, Takeshi Oishi<sup>††</sup> and Katsushi Ikeuchi<sup>††</sup>

**Abstract** We developed Mixed Reality (MR) content that reconstructs the ancient capital of Asuka-Kyo and applied a fast shading and shadowing method that uses shadowing planes. Subjective evaluation with a head-mounted display showed that viewing this content increased the audience's knowledge both of Asuka-Kyo and of MR technologies. We also conducted impression evaluation tests with and without shading and shadowing. Content with shading and shadowing received more favorable evaluations from the audience when they were asked to rate it according to how "Realistic," "Spectacular," and "Entertaining" it was.

キーワード：複合現実感、拡張現実感、光学的整合性、デジタルコンテンツ、主観評価

## 1. まえがき

近年、CG (Computer Graphics) や VR (Virtual Reality) 技術を用いて、文化遺産をデジタルコンテンツ化する試みが行われている<sup>1)~5)</sup>。このようなデジタルコンテンツは、博物館に収蔵されている文化財や現地でしか見ることのできない遺跡を、インターネットや VR システムを用いて広く公開することができる。そのため、教育分野での体験学習や協調型学習、映画・ゲームなどのエンタテイメント産業、地方自治体の観光振興等において、活用が期待されている。

一方、複合現実感 (MR: Mixed Reality) 技術<sup>6)</sup> を用いて遺跡の遺構上に復元モデルを合成表示する取組みが行われるようになってきている。CG アニメーションや VR コンテンツは PC のディスプレイ上や VR シアタでしか鑑賞することができず、臨場感や現実感に乏しいといった問題がある。これに対して MR では、実世界の景観や雰囲気等の環境情報をそのまま利用できるため、ユーザはより高い

臨場感を体験することが可能である。また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るが、観光振興の観点から文化財の整備や活用を求められる場合も多い。これに対して MR では、実世界の遺構に物理的な影響を与えずに効果的な展示を行うことが可能であり、遺跡の保存と活用を両立することができる。

MR による遺跡復元の事例はこれまでにもいくつか報告されている。天目らは奈良県の平城宮跡を対象として、ウェアラブルコンピュータ・PDA・携帯電話等のモバイル端末を用いたナビゲーションシステムを提案している<sup>7)</sup>。盛川らは双眼鏡型の MR ディスプレイ装置を用いて平城宮大極殿の復元を行っている<sup>8)</sup>。ARCHEOGUIDE プロジェクトでは古代ギリシアのオリンピア遺跡を復元する試み等も行われている<sup>9)</sup>。

しかし MR による遺跡復元において、実画像と仮想物体の照明条件を一致させるという試みはほとんどなされていない。MR において違和感のない合成画像を生成するためには、実世界と仮想世界との間の位置合わせを行い（幾何学的整合性）、両者の色・明るさ・陰影等<sup>10)11)</sup> を一致させる必要がある（光学的整合性）。幾何学的整合性については画像中のマーカや特徴点、磁気センサやジャイロを用いた様々な手法が提案され、一般に広く用いられている。光学的整合性についてはカメラや鏡面球を用いた光源環境推定手法<sup>12)~14)</sup> や、シャドウマップ法やシャドウボリューム法を用いた影付け手法<sup>15)16)</sup> が提案されている。また筆者らは、光源環境の変化に対応して実時間でソフトシャドウ

2008年3月12日受付、2008年5月30日再受付、2008年7月4日採録  
†東京大学 大学院 学際情報学府・日本学術振興会特別研究員 DC

(〒113-0033 文京区本郷 7-3-1, TEL 03-5841-5938)

††東京大学 大学院 情報学環

(〒113-0033 文京区本郷 7-3-1, TEL 03-5841-5938)

†Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo, JSPS Research Fellow  
(7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan)

††Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo  
(7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan)

を表現することのできる、影付け平面という概念を用いた陰影表現手法を提案している<sup>17)</sup>。しかし、これらの手法を実際の遺跡復元コンテンツに適用した事例はない。

また実際の MR コンテンツにおいて、コンテンツがユーザに与える効果や光学的整合性の評価はあまり行われていない。これまでに、VR コンテンツの教育効果の評価<sup>3)18)</sup>や、映像から受ける印象の主観評価<sup>19)~21)</sup>は行われているが MR においてはほとんど例がない。光学的整合性に関しては、実・仮想遮蔽物体によって生じる影の誤差評価<sup>22)</sup>、キャストシャドウのずれに関する許容範囲の評価<sup>23)</sup>や顔の合成画像における色差や陰影の不整合に関する評価<sup>24)</sup>等は行われている。しかしこれらの事例では、MR における陰影表現がユーザのどのような主観的心理因子に影響し、どのようなコンテンツに対して有効であるかという点に関する議論は行われていない。また、評価実験は実験室の限定された環境下で行われており、実際に遺跡復元等の MR コンテンツに適用した事例は報告されていない。

そこで本論文では、実時間でのソフトシャドウ表現が可能な影付け平面を用いた陰影表現手法<sup>17)</sup>を適用した遺跡復元 MR コンテンツを作成し、屋外の遺跡現地における主観評価実験によって、コンテンツの教育効果と陰影表現の有効性について評価した結果を示す。陰影評価実験では特に、MR システムにおける仮想物体の陰影がユーザの心理やコンテンツの評価に及ぼす影響について調査した。

復元対象には、6~7世紀に現在の奈良県明日香村に存在したとされる古代飛鳥京を選択した。また、実験は遺跡現地におけるコンテンツ一般公開イベントの一環として行い、一般の観光客の中から被験者を募集した。そして、コンテンツの体験前後における被験者の学習効果を比較し、飛鳥京や MR 技術に対する知識・関心の向上について評価した。さらに、「陰影なし・陰影あり」の状態で合成映像を提示し、SD 法 (Semantic Differential Technique) と因子分析によってコンテンツに対する陰影表現の有効性を評価した。

以降、第 2 章では MR コンテンツに関して復元対象である飛鳥京の概要と CG モデルの制作過程について概説する。また、本コンテンツに適用した陰影表現手法とコンテンツの表示方法について説明する。第 3 章ではコンテンツの教育効果の評価実験、第 4 章では陰影表現の有無によるコンテンツの印象評価実験について述べる。最後に第 5 章で、まとめと今後の課題について述べる。

## 2. 飛鳥京 MR コンテンツ

本研究の復元対象である飛鳥京の概要と、MR コンテンツの製作過程について概説する。また本研究で用いた陰影表現手法の概要とコンテンツの表示方法について述べる。

### 2.1 飛鳥京 CG モデルの復元

飛鳥京とは、6世紀末の推古朝から7世紀末の天武朝にかけて飛鳥地方（現在の奈良県明日香村）にあったとされる諸天皇の宮殿が置かれた都の総称を指す。当時の宮殿や史

跡が発掘されている明日香村には多くの観光客が訪れるが、ほとんどの遺跡は現存しないため飛鳥京の景観を思い浮かべるには想像に頼るほかない。また明日香村は、古都保存法の適用地域であるため厳しい開発規制が設けられており、新たな博物館や遺跡のレプリカの建設は難しいという状況がある。さらに飛鳥京は、現在も発掘調査が盛んに行われておらず、新たな考古学的発見によって復元案の変更が生じる可能性がある。そのため飛鳥京を復元するには、遺跡の現状に影響せず実世界とのわかりやすい重畳表示が可能な MR システムの活用が有効である。

本研究で取組んだ飛鳥京の復元範囲は、飛鳥淨御原宮と川原寺・飛鳥寺・石神遺跡・飛鳥苑池遺構を含む南北約 1350m、東西約 600m の範囲である。宮殿地域は発掘調査により時期の異なる遺構が重なって存在することがわかっている。そこで、他の時期に比べて遺構が上層にあり、建物配置が明らかになっている伝飛鳥板蓋宮跡 III-B 期（672~694 年）の復元を行った。III-B 期の淨御原宮は、III-A 期（後飛鳥岡本宮）の内郭の南東に東西 94 m、南北 55m のエビノコ郭を増設した段階の宮殿である。宮域は南北 720m、東西 100~450m の範囲に広がり、外郭内と宮域の周辺には苑地や官衙が立ち並んでいたと考えられている。

飛鳥京の復元 CG モデルを作成するにあたっては、奈良文化財研究所と権原考古学研究所から提供を受けた復元図面を参照した。モデリングは 3dsmax™ を用いて手作業で行った。寺院の丹土・緑青・黄土・白土塗りと瓦屋根、宮殿の白木造りと桧皮葺の屋根はテクスチャ画像を用いて表現した。図 9 に淨御原宮、図 10 にエビノコ大殿の復元 CG モデルを示す。また図 11 (b) に淨御原宮モデルの現在の風景との合成画像を示す。なお製作したモデルのポリゴン数は約 686,000 である。

飛鳥京 MR コンテンツの制作要件としては、1) 大規模で複雑な CG モデルを実時間で描画しなければならず、2) ユーザがコンテンツを間近で見るため写実的な描画を行う必要があり、3) 屋外で長時間表示するため光源環境の変化を考慮した陰影処理を行わなければならない、という 3 点が挙げられる。しかし、処理速度と陰影表現の写実性はトレードオフの関係にあり、MR 分野で実時間影付けを行った従来研究<sup>15)16)</sup>では、限定された光源環境下でのハードシャドウしか表現できなかった。そこで本論文では、上記の三つの条件を解決するため、屋外での光源環境の変化に対応して、仮想物体のソフトシャドウを実時間で生成することのできる文献（17）の陰影表現手法をコンテンツに適用した。飛鳥京の建築物は静的であり、組物を持たず屋根の反りが少ない単純な形状であるため、文献（17）で提案された影付け平面の適用が容易である。また金物や鳴尾などの鏡面反射成分を含む素材を持たないため、基礎画像の合成によって陰影を正確に復元することが可能である。

### 2.2 陰影表現

本コンテンツに適用した影付け平面と基礎画像による陰

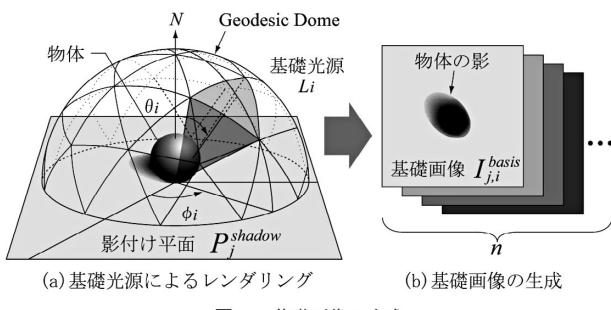


図 1 基礎画像の生成  
Generation of basis images.

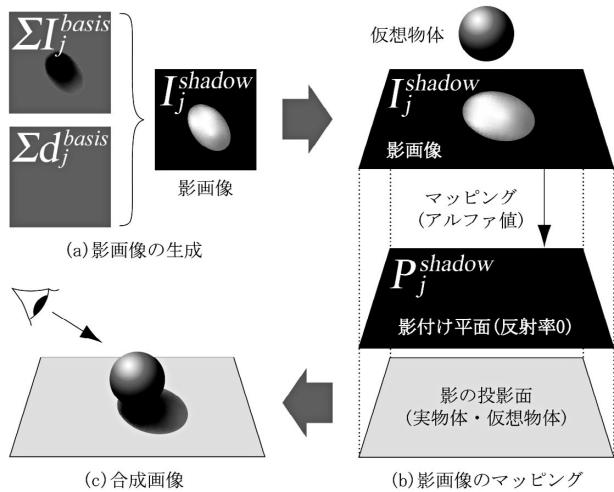


図 2 影画像の作成と影付け平面へのマッピング  
Generation of shadow images and mapping onto shadowing plane.

影表現手法<sup>17)</sup>の概要について説明する。この手法では計算負荷の高いソフトシャドウのレンダリングを前処理で行い、逐次処理では基礎画像の合成とマッピングを行うことによって、物体の影付けを高速に行う。

### (1) 前処理

前処理段階では影付け平面と呼ぶ物体をシーンに配置し、光源環境を離散的に近似した基礎光源を用いてレンダリングすることによって、物体の影を基礎画像として保存する。まず、実・仮想物体の凸包から影付け平面と呼ぶ平面形状の物体  $P_j^{\text{shadow}} \{j = 1, 2, \dots, m\}$  を生成し、これをシーンの3Dモデル表面上に配置する。次に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Geodesic Domeを用いて分割することにより  $n$  個の基礎光源  $L_i (i = 1, 2, \dots, n)$  を生成する。そして図1に示すように、各々の基礎光源を用いてシーンをレンダリングし、影付け平面に落ちる物体の影を基礎画像  $I_{j,i}^{\text{basis}}$  として取得する。また同様に、各々の基礎光源で照射した時の影付け平面表面上の拡散反射成分を  $d_{j,i}^{\text{basis}}$  として保存しておく。

### (2) 逐次処理

逐次処理段階では、カメラを用いて実世界の光源分布を推定し、前処理で生成した基礎画像の線形和を求め影付け平面にマッピングすることによって、物体の影を高速に表現する。まず魚眼レンズを装着したカメラを用いて実世界



図 3 評価実験の様子  
Appearance of evaluation experiment.

の光源環境を撮影し、全方位画像を取得する。この全方位画像に対してGeodesic Domeを投影し、各々の基礎光源に対する放射輝度パラメータ  $S_i$  を計算する。そして放射輝度パラメータをシーン内の基礎光源の放射輝度に反映することにより、仮想物体表面のシェーディングを行う。また、放射輝度パラメータ  $S_i$  と基礎画像  $I_{j,i}^{\text{basis}}$  および拡散反射成分  $d_{j,i}^{\text{basis}}$  の線形和を求める。両者の比を計算することにより、実光源環境に対応したソフトシャドウを表す影画像  $I_j^{\text{shadow}}$  を得ることができる(図2)。最後に影付け平面  $P_j^{\text{shadow}}$  に影画像  $I_j^{\text{shadow}}$  をマッピングし、アルファブレンディングを行うことにより物体表面の影を表現する。なお、基礎画像の線形結合処理はハードウェアを用いて高速に計算することが可能である。

## 2.3 コンテンツの表示

### (1) MRシステム

基本となるMRシステムには、キヤノン社のMR Platform<sup>25)</sup>を用いた。MR Platformはビデオシースルー方式のHMD(Head-Mounted Display), 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。HMD上に表示される合成映像の大きさは640×480画素である。また、文献(17)の陰影表現において実光源環境を取得するために、魚眼レンズ(FIT社FI-19)を使用した。実験に用いたPCの仕様は、OS: Windows XP(SP2), CPU: Core2Duo E6850 3.0GHz, RAM: 4GB, GPU: nVIDIA GeForce8800GTS 640MBである。

### (2) 表示環境

淨御原宮の遺跡現地において、HMDによる実環境と復元モデルの合成表示を行った。CGモデルは高さ2メートル程度の塀を含むため、被験者が内郭を見渡せるよう図3に示すような高さ1.5メートルの足場を用意し、その上で合成映像の提示を行った。MRシステムの設置場所につい

表 1 教育効果の評価項目と質問項目の対応関係  
Relation of evaluation item of education effect and question item .

評価項目	質問項目
1. 飛鳥京や明日香村の地域社会への関心を高める	Q1. 飛鳥時代の歴史や文化について、知りたいですか？ Q2. 明日香村の他の遺跡を訪ねてみたいですか？
2. 飛鳥時代の歴史や文化に対する新知識の獲得	Q3. かつて飛鳥京がここにあったと感じられますか？ Q4. 飛鳥時代の建築物がどのようなものであったか知っていますか？ Q5. 飛鳥時代の人々の暮らしを思い描くことができますか？ Q6. 飛鳥京の実際の大きさを想像できますか？
3. 文化財保護の重要性について理解させる	Q7. 文化財の保護は重要であると思いますか？ Q8. 複合現実感を用いた文化財の復元は重要であると思いますか？
4. CG, MR の仕組みと特性を理解させる	Q9. ディスプレイを動かすと視点が変化するという仕組みは、わかりますか？ Q10. 複合現実感技術の仕組みを知っていますか？

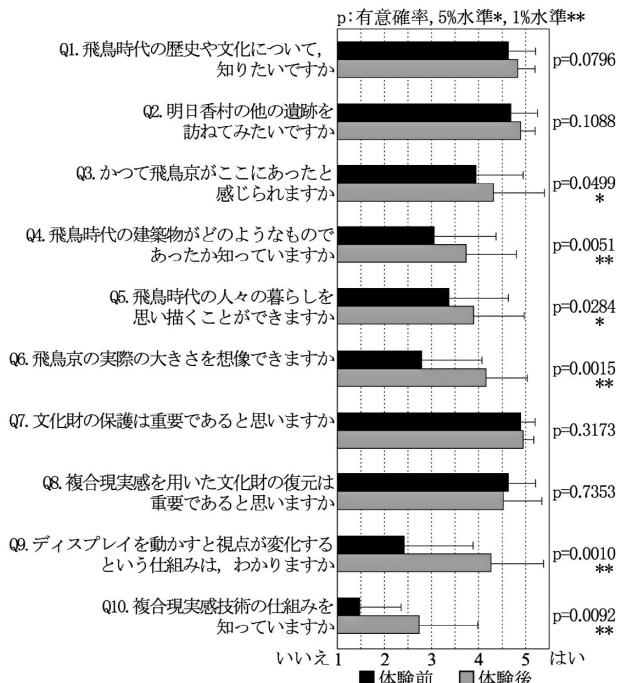


図4 コンテンツ体験前後の教育効果平均点  
Average score of education effect before and after contents experience.

では、付近に建物がなく田畠が広がっているため陰影計算を正確に行うことができ、さらにユーザが360度に渡って周囲を見回すことが可能な淨御原宮内郭正殿北東方向とした。また、光源推定のためのカメラは被験者や装置類が映りこまないように、MRシステムから5メートル離して設置した。

図12にMRシステムによる合成映像を示す。文献(17)の陰影表現手法を適用したことによって、従来は困難であった屋外環境でのソフトシャドウ表現が可能になった。またMRシステム上でフレームレートを低下させることなく実時間での陰影表現と合成処理が可能になった。

### 3. 教育効果の評価実験

本研究で提案する飛鳥京MRコンテンツの教育効果を評価するため、MRシステムの体験前後でコンテンツに対する学習効果を比較する実験を行った。

#### 3.1 調査方法

28~77歳（平均年齢49.63歳）の男女19名（男性12名、女性7名）の被験者に対して、コンテンツの体験前後に様々な学習効果を問う調査用紙に記入を依頼した。調査項目の作成にあたっては、文部省「高等学校学習指導要領（平成11年告示）」の地理歴史・情報科における教科目標を参考にした。具体的には、MRコンテンツによる学習効果が期待される、1) 復元対象への関心、2) 歴史的な知識、3) 文化財保護の意識、4) MRシステムの理解、の四つの評価項目を仮定し、これらの項目に関連する10の質問を用意した。表1に評価項目と質問項目の対応を示す。調査用紙にはこれらの質問項目をランダムに配置し、各質問に対して5段階での評価を求めた。なお、被験者1人あたりの映像体験時間は2分とした。

#### 3.2 結果・考察

体験前後の評価値を比較した結果、ほぼ全ての質問項目で体験後の点数が向上していることがわかり、コンテンツの教育効果を確認することができた。図4にコンテンツ体験前後の各質問項目ごとの評価値の平均値、および体験前後のデータに対するウイルコクソン符号付順位和検定によるp値を示す。p値は得点の偏りが偶然下で出現する有意確率（両側検定）を表している。各項目につけられた\*, \*\*の記号はそれぞれ有意水準5%未満( $p<0.05$ )、1%未満( $p<0.01$ )の項目であることを示している。Q4・6・9・10およびQ3・Q5の質問項目については、それぞれ有意水準1%未満、5%未満で有意な差が検出された。

この結果により、本実験で仮定した四つの評価項目のうち、2) 歴史的な知識、4) MRシステムの理解、について、提案するコンテンツは有意な教育効果をもつことがわかった。まずQ3・6の結果からは、MRコンテンツは、飛鳥京のスケール感や往時の建築物と現在の地形との空間的な対応関係を認識させる効果があることがわかる。特にQ6は体験後に得点が大きく向上しており、被験者は現在は見ることのできない飛鳥京の大きさをMRシステムを通して体感できたのではないかと推察できる。文献(17)の陰影表現手法を適用したことは、仮想物体の立体感やスケール感を表現する上で有効であったと考えられる。また、Q9・10の結果からは、コンテンツを体験することによってMR

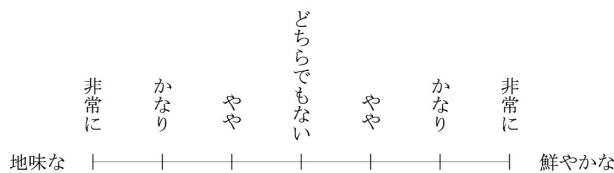


図 5 SD 法における評価尺度の例  
Sample of grading scale in the SD technique.

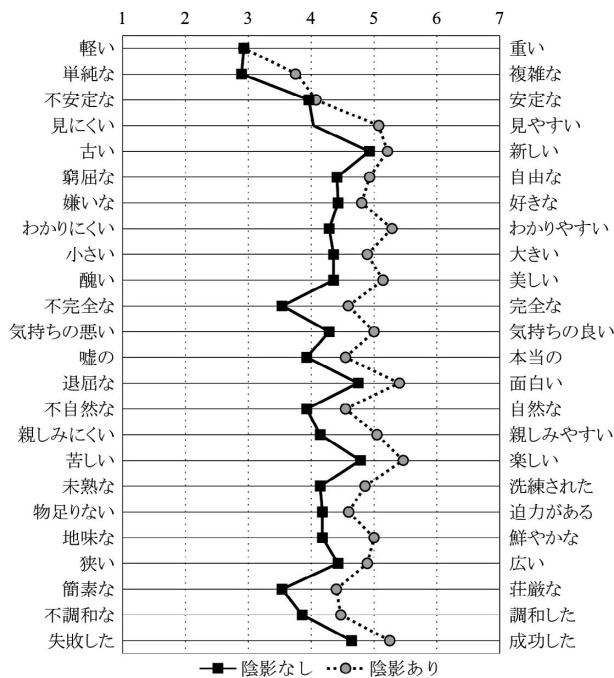


図 6 各形容詞対に対する評価値の平均点  
Average score for every adjective pairs.

に関する知識やシステムへの理解が向上することがわかる。これらの項目の体験前の平均値はそれぞれ 2.42 点, 1.47 点であり、他の質問項目に比べて低かったが、体験後は得点が大きく向上している。MR システムを実際に体験することによって、被験者の理解が深まったと考えられる。

一方、飛鳥京・明日香村への関心を問う Q1・2 の質問と、文化財保護の意識を問う Q7・8 の質問では、有意な教育効果が見られなかった。これは、本実験に参加した被験者の関心・意識が初めから高く、上記の質問の評価値平均点が高得点に偏っているため、コンテンツの体験による影響が現れなかつたのではないかと考えられる。特に Q7 の平均点は体験前 4.89 点と、他の質問項目に比べて最も高かった。なお Q8 のみ体験後の評価値が減少しているが、 $p=0.7353$  と有意確率が著しく高いため、偶然誤差によるものと推察できる。

#### 4. 陰影表現の有無に対する印象評価実験

この実験では、まず MR コンテンツからユーザが受ける主観的な印象の調査を行い、合成映像の評価に関する潜在的な心理因子を明らかにした。次に、MR における陰影表現の有効性を調べるため、陰影の有無によってこれらの心理要因に差が生じるかどうかを検討した。

表 2 各形容詞対の因子負荷量  
Factor loadings for every adjective pairs.

形容詞対	因子負荷量		
	因子 1	因子 2	因子 3
<b>因子 1：現実感</b>			
嘘の一本当の	<b>0.947</b>	0.075	-0.171
不完全な一完全な	<b>0.677</b>	-0.060	0.316
不調和な一調和した	<b>0.628</b>	0.052	0.095
簡素な一莊厳な	<b>0.619</b>	0.079	0.287
不自然な一自然な	<b>0.546</b>	0.134	0.287
気持ちの悪い一気持ちの良い	<b>0.535</b>	0.204	0.206
<b>因子 2：鮮烈さ</b>			
地味な一鮮やかな	0.057	<b>0.840</b>	0.034
物足りない一迫力がある	0.187	<b>0.815</b>	-0.064
失敗した一成功した	-0.108	<b>0.706</b>	0.228
未熟な一洗練された	0.489	<b>0.551</b>	-0.090
狭い一広い	0.190	<b>0.517</b>	0.041
<b>因子 3：娯楽性</b>			
わかりにくい一わかりやすい	-0.096	0.175	<b>0.868</b>
窮屈な一自由な	0.140	-0.093	<b>0.629</b>
嫌いな一好きな	0.065	0.236	<b>0.545</b>

#### 4.1 調査方法

遺跡の復元 CG モデルを「陰影なし・陰影あり」の二つの条件で合成表示し、被験者に合成映像の印象を評価させた。主観評価方法には SD 法を採用した。印象評価に用いる形容詞対については、Osgood の提案する 76 の形容詞対<sup>26)</sup>の中から、映像から受けた印象を適切に表すと思われる 24 対を選択し、それぞれ 7 段階の評価を求めた。調査用紙に記載した評価尺度の例を図 5 に示す。

第 3 章の教育効果実験に参加していない 12~81 歳（平均年齢 51.88 歳）の男女 56 名（男性 28 名、女性 28 名）で構成される被験者を二つのグループに分け、それぞれの被験者に「陰影なし・陰影あり」のどちらかの合成映像（図 13）を提示した。なお被験者には陰影の有無について教示は行わなかった。また実光源環境の変化による陰影条件の差異を抑えるため、実験は天候の変化が少ない晴天時に両グループとも 1 時間以内で行った。被験者 1 人あたりの映像体験時間は 3 章の実験同様 2 分とした。

#### 4.2 結果・考察

まず、「陰影なし・陰影あり」の場合における各形容詞対の評価値の平均点を図 6 に示す。図の左側が否定的な形容詞、右側が肯定的な形容詞となっている。平均点を比較すると、すべての形容詞において「陰影なし」に比べて「陰影あり」の方が肯定的な方向に偏っていることがわかる。CG モデルの陰影付けを行うことによって、コンテンツの評価が全体的に向上することがわかる。特に、「見やすい-見にくい」「完全な-不完全な」の形容詞対で 1.0 以上の大差が見られる。これは陰影の付加によってモデルの立体

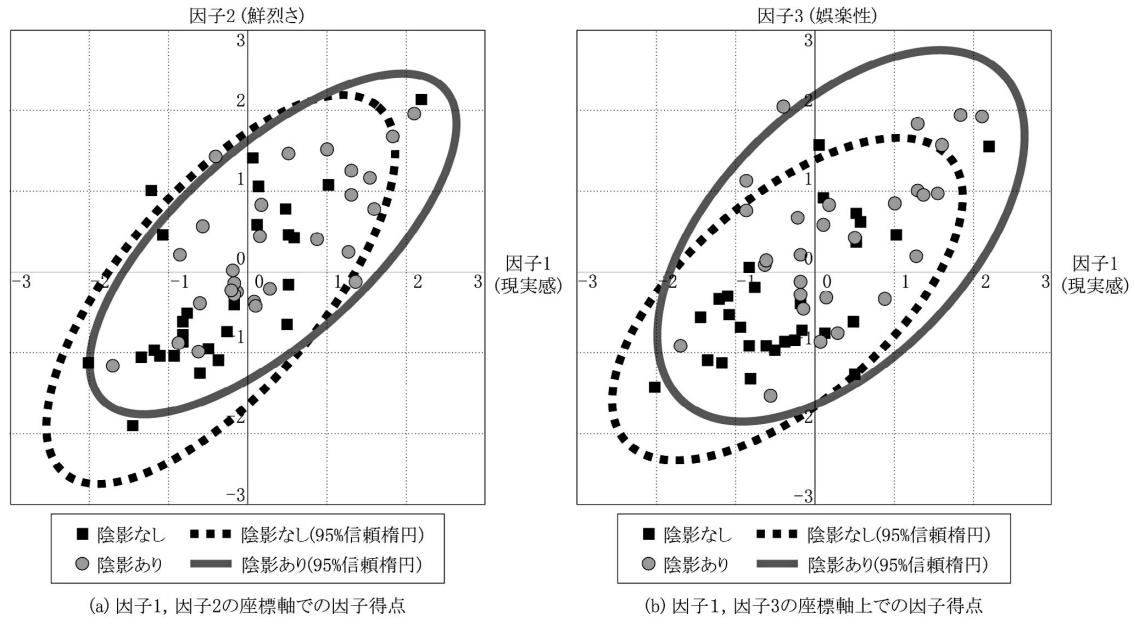
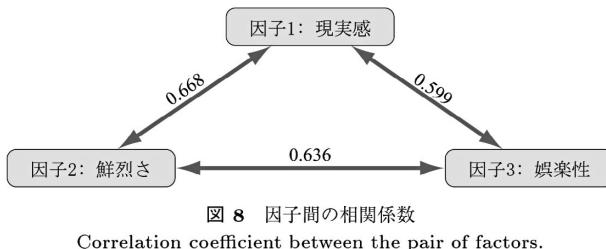


図 7 隱影なし・陰影ありの場合の各被験者の因子得点  
Factor score of subjects with or without shading and shadowing.



感が強調され、本物らしさが高まるためではないかと考えられる。一方、「重い-軽い」「安定な-不安定な」の形容詞対では、平均値の差はほとんど見られない。仮想物体の陰影付けはモデルの力量感にはあまり影響しないのではないかと考えられる。

次に、コンテンツの評価に関する潜在的な共通因子を明らかにするため、得られた印象評価値に対して因子分析を行った。まず主因子法によって初期因子を抽出し、因子軸の回転（プロマックス回転）を行った。各形容詞対について、因子負荷量の絶対値にもとづいて並び替えた結果を表2に示す。実験結果から三つの因子が抽出され、多くの形容詞対がこれらの因子で説明できることがわかる。

第1因子は「嘘の-本当の」の形容詞対の因子負荷量が0.947と特に高く、「不調和な-調和した」「不自然な-自然な」の形容詞対を含むことから、合成映像における実画像と仮想物体の調和や整合性を表すものと判断し、「現実感」と命名した。第2因子は「地味な-鮮やかな」「物足りない-迫力がある」の形容詞対の因子負荷量が大きいことから、映像の魅力や迫力を表すものと判断し、「鮮烈さ」と命名した。第3因子は「わかりにくい-わかりやすい」「窮屈な-自由な」「嫌いな-好きな」の形容詞対の因子負荷量が大きいことから、コンテンツ自体の受け入れやすさやおもしろさ、インタ

ラクティブ性に関わるものと判断し、「娯楽性」と命名した。「陰影なし・陰影あり」のそれぞれのグループの被験者について、上記の3因子に関する因了得点をプロットしたものを図7に示す。図中の楕円は因子1と因子2（図7(a)）、因子1と因子3（図7(b)）の各座標軸に対して因子得点の2次元正規分布を仮定し、平均値に関する95%信頼域を示したものである。各グループの分布を比較すると、いずれの因子軸においても「陰影あり」の方が「陰影なし」に比べて高得点に偏っていることがわかる。特に図7(b)因子3「娯楽性」の軸では両者の差が大きい。

図8に各因子間の相関係数を示す。各因子間にそれぞれやや高い相関が見られ、映像の評価に関して現実感・鮮烈さ・娯楽性の各因子が強く結びついていることがわかる。このことからもMRにおける正確な陰影表現は、実・仮想物体間の整合性だけでなく、映像・モデルの鮮明さや迫力、コンテンツ自体のエンタテイメント性やインタラクティブ性も同時に大きく向上させることができた。屋外のMRシステムにおいて仮想物体の写実的な陰影を表現する手法の一つとして文献(17)が挙げられる。本研究では文献(17)の手法を用いて陰影付けを行うことにより、コンテンツに対するユーザの主観的な評価を高めることができた。

## 5. む す び

本論文では、影付け平面による高速陰影表現手法を適用した飛鳥京復元MRコンテンツを開発し、コンテンツの教育効果と陰影表現の有効性を評価した。その結果、提案するコンテンツは復元対象の空間的把握やMR技術への理解を高める上で有意な教育効果を持つことが示された。さらにコンテンツに対する印象評価実験の結果、ユーザは1)合成映像における仮想物体の現実感や風景との調和を表す

「現実感」、2) 映像の魅力や迫力を表す「鮮烈さ」、3) おもしろさやインタラクティブ性に関わる「娛樂性」、の3つの因子によってコンテンツを評価していることがわかった。また陰影を付加した場合は上記のすべての因子について評価の向上が見られた。このことから、MRコンテンツに対する陰影表現は「現実感」だけではなく、映像の印象やコンテンツとしてのおもしろさを高める上でも有効であることが示された。

今後の課題としては、教育効果評価実験で有意な学習効果が見られなかった「復元対象への关心、文化財保護の意識」を向上させるための工夫として、合成映像の提示だけではなく文字情報や音声解説等の複合的な情報提供を行うことが挙げられる。MRコンテンツの主観的評価を向上させるためには、実・仮想物体の幾何学的・光学的整合性を達成して合成映像の「現実感」を向上させることが重要であると考えられる。また、高解像度や高ダイナミックレンジ映像を用いて映像の「鮮烈さ」を印象付けることも有効であると推察される。さらに解説情報や視点移動などのインタラクティブ性を追加して、コンテンツの「娯楽性」を高めることも効果的であると考えられる。

なお本研究の一部は、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、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橿原考古学研究所、奈良文化財研究所に感謝の意を表する。

## 〔文 献〕

- 1) 小鹿丈夫：“VRによる世界遺産の構築”，映情学誌，55, 1, pp.31-36 (2001)
- 2) K. Utsugi, T. Moriya and H. Takeda：“Making of a virtual world of heijokyo from historical knowledge”，Proc. Int. Conf. on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2001), pp.455-462 (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論誌，8, 1, pp.65-74 (2003)
- 4) M. Callieri, P. Debevec, J. Pair and R. Scopigno：“A realtime immersive application with realistic lighting: the parthenon”，Computer & Graphics, 30, 3, pp.368-376 (2006)
- 5) 鎌倉真音、大石岳史、高松淳、池内克史：“3次元モデルによるバイヨン寺院顔面解析と製作背景の考察”，映情学誌，61, 4, pp.1-6 (2007)
- 6) 田村秀行、大田友一：“複合現実感”，映情学誌，52, 3, pp.266-272 (March 1997)
- 7) R. Tenmoku, Y. Nakazato, A. Anabuki, M. Kanbara and N. Yokoya：“Nara palace site navigator: device-independent human navigation using a networked shared database”，Proc. Int. Conf. on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), pp.1234-1242 (2004)
- 8) 盛川浩志、河合隆史、大谷淳：“強化現実技術を用いた復元遺跡観察装置の開発”，3次元画像コンファレンス 2003 講演論文集 (2003)
- 9) V. Vlahakis, N. Ioannidis, J. Karagiannis, 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, 22, 5, pp.52-60 (2002)
- 10) N. Sugano, H. Kato and K. Tachibana：“The effects of shadow representation of virtual objects in augmented reality”，Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR03), pp.76-83 (2003)
- 11) C. B. Madsen, M. K. D. Sorensen and M. Vittrup：“The importance of shadows in augmented reality”，Proc. 6th Annual

International Workshop on Presence, p.21 (2003)

- 12) 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”，信学論 (D-II), J-84-D-II, 8, 1234-1242, (August 2001)
- 13) M. Kanbara and N. Yokoya：“Geometric and photometric registration for real-time augmented reality”，Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR02), pp.279-280 (September 2002)
- 14) 安室喜弘、石川悠、井村誠孝、南広一、眞鍋佳嗣、千原国宏：“立体マークを用いた実空間における仮想物体の調和的表現: インタラクティブMRインテリアデザイン”，映情学誌，57, 10, pp.1307-1313 (2003)
- 15) M. Haller, S. Drab, and W. Hartmann：“A Real-Time Shadow Approach for an Augmented Reality Application Using Shadow Volumes”，Proc. Symp. on ACM Virtual Reality Software and Technology(VRST'03), pp.56-65 (October 2003)
- 16) 神原誠之、岩尾友秀、横矢直和：“拡張現実感のための動的シャドウマップを用いたシャドウレンダリング手法”，画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005), pp.297-304 (2005)
- 17) 角田哲也、大石岳史、池内克史：“影付け平面を用いた複合現実感における高速陰影表現手法”，映情学誌，62, 5, pp.788-795 (2008)
- 18) 濱戸崎典夫、森田裕介、竹田仰：“ニーズ調査に基づいた多視点型VR教材の開発と授業実践”，日本バーチャルリアリティ学論誌，11, 4, pp.537-544 (2006)
- 19) 加藤大一郎、石川秋男、津田貴生、福島宏、山田光穂：“カメラワーク分析と映像の主観評価実験”，映情学誌，53, 9, pp.1315-1324 (1999)
- 20) 川崎智博、井手口健：“動画映像から受け取る印象の因子分析と映像再生速度の各因子に与える影響”，信学論, J85-A, 9, 1022-1025, (2002)
- 21) 成田長人、金澤勝：“2D/3D HDTV画像の心理因子分析と総合評価法に関する考察”，映情学誌，57, 4, pp.501-506 (2003)
- 22) I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi：“Illumination from Shadows”，IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 25, 3, pp.290-300 (2003)
- 23) 中野学、北原格、亀田能成、大田友一：“複合現実感における影の不整合に関する実験的検討”，信学会 2007 年総合大会講演論文集, pp.169 (2007)
- 24) 竹村雅幸、北原格、大田友一：“MR Face 映像における光学的不整合に関する視覚特性の評価”，日本バーチャルリアリティ学論誌，12, 2, pp.181-190 (2007)
- 25) S. Uchiyama, K. Takemoto, K. Satoh, H. Yamamoto, and H. Tamura：“MR Platform: a basic body on which mixed reality applications are built”，Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR02), pp.246-253 (2002)
- 26) C. E. Osgood：“The Measurement of Meaning”，University of Illinois (1957)



かくた てつや  
**角田 哲也** 2002 年、京都大学工学部建築学科卒業。2005 年、東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻修士課程終了。現在、同大学院学際情報学府学際情報学専攻博士課程在籍。日本学術振興会特別研究員 DC。複合現実感の研究に従事。



おおいし たけし  
**大石 岳史** 1999 年度應義塾大学理工学部電気工学科卒業。2002 年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻修士課程修了。2005 年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻博士課程修了。同年東京大学生産技術研究所特任助手、2006 年特任助教を経て、2007 年より東京大学大学院情報学環特任講師。実物体の形状モデリングの研究に従事。博士（学際情報学）。



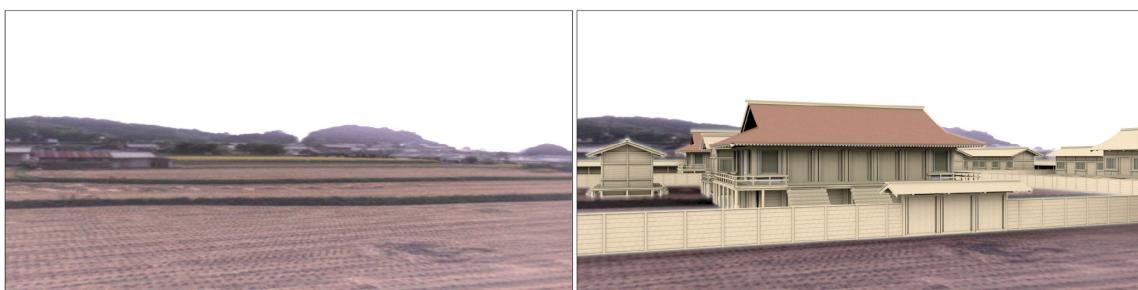
いけうち かつし  
**池内 克史** 京都大学工学部機械工学科卒業。1978 年、東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程終了。MIT 人工知能研、電総研、CMU 計算機科学科を経て、1996 年より、東京大学生産技術研究所教授。2000 年より、東京大学大学院情報学環教授兼任。人間の視覚機能、明るさ解析、物体認識、人間による組立て作業の自動認識などの研究に従事。正会員。



図 9 淨御原宮復元 CG モデル  
Restoration CG model of Kiyomiharanomiya palace.



図 10 エビノコ大殿復元 CG モデル  
Restoration CG model of Ebino kodaiden.



(a) 現在の淨御原宮の風景  
(b) 淨御原宮復元CGモデル合成画像

図 11 現在の淨御原宮と復元 CG モデル合成画像  
Present photo of Kiyomiharanomiya and reconstruction image.



図 12 MR システムを用いた淨御原宮 CG 合成映像の一部  
Synthesized image of Kiyomiharanomiya palace on MR sysystem.



(a) 評価画像（陰影なし）  
(b) 評価画像（陰影あり）

図 13 陰影なし・陰影ありの場合のコンテンツ印象評価映像の一部  
Content impression evaluation images with or without shading and shadowing.