

修 士 学 位 論 文

**拡張現実感における建築物の陰影表現手法**



平成 16 年度  
東京大学学際情報学府  
学際情報学専攻 学際情報学コース  
学籍番号 49-36108

**角田 哲也**

指導教官 池内 克史 教授

# 論文要旨

## 拡張現実感における建築物の陰影表現手法

学際情報学コース

学籍番号 49-36108

角田 哲也

近年、科学技術の進歩により CG による文化財の復元が可能となった。また、CG で描かれた仮想物体を現実世界に合成表示する拡張現実感技術が注目を浴びている。

そこで本研究では、奈良県明日香村川原寺跡を対象に、拡張現実感による遺跡現地での文化財建築の復元展示を試みる。川原寺は飛鳥四大寺の一つに数えられた歴史上重要な建築文化財であるが、現在では主要な建物は失われ、わずかに基壇と礎石の一部を残すのみである。

さらに本研究では、拡張現実感における重要な技術課題である仮想物体と実画像の光学的整合性の実現に向けて、実時間での高速な陰影付け手法を提案する。従来、拡張現実感における合成画像の写実性向上のためには、実世界画像と仮想物体との光学的整合性の実現が重要と考えられてきた。そのためには仮想物体のシェーディングおよび影付けが実世界の物体と一致することが必要とされる。

本論文の提案手法では、あらかじめオフラインで生成した基礎画像の集合から仮想物体の影を合成することにより、刻々と変化するユーザの視点に応じて実時間に CG の影付け処理を行うことが可能である。また実世界の光源情報はビデオカメラにより逐一取得するため、屋外のような光源が変化する状況下においても実世界にある物体と違和感のない陰影付けを行うことができる。

川原寺跡を対象に拡張現実感システムを構築し明日香村現地において復元展示を行った結果、合成画像における実物体と仮想物体の光学的整合性を飛躍的に向上させることに成功し、提案手法の有効性を確認することができた。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたって、すばらしい研究環境を整えていただき、忙しい御身にも関わらず、適切なお指導とお鞭撻をいただきました池内克史教授に心からお礼申し上げます。

また、ご自身の論文執筆でお忙しい時期にも関わらず、丁寧なアドバイスをいただいた先輩の大石岳史さんには、この場を借りて深い感謝の意を表します。連日の深夜にわたる白熱した議論にお付き合いいただき、再度にわたる屋外実験では重い機材の運搬に骨身を惜しまずご協力いただくなど、研究生活の様々な場面でお世話になりました。

また、長期にわたりカメラなどの実験機材をお貸しいただいた佐藤いまりさん、プログラミングの相談に乗っていただき、技術資料の紹介や貴重なサンプルコードをご提供いただいた小川原光一さんに感謝いたします。

さらに、学会出席や事務手続きでお世話になりました池内研究室の秘書のみなさま、職員の方々には深く感謝いたします。特に秘書の平山幸恵さん、小林聡子さんには、私の不手際で生じたトラブルに冷静に対処して下さい、実験の手配にもご尽力いただきたくなど、研究の実務的な側面で甚大なご助力をいただきました。御二方の日本美術史に対する深い慧眼と惜しみないアドバイスは、研究を進める上でどれだけ励みになったことか知れません。

明日香村での実験において、貴重な時間を割いてお手伝いいただいた山田陽介さん、長谷川仁則さんには改めて御礼申し上げます。酷寒の奈良盆地で、朝5時起き  
の激務に耐えて下さったお二人の助力なくしては、この実験は不可能でした。

本研究のきっかけをいただき、多忙なご公務の合間を縫って実験を見守ってくださった明日香村の関義清村長に、この場を借りて深い感謝の意を表します。また研究を進めるにあたって貴重な復元資料をご提供いただいた奈良文化財研究所、史跡での実験を許可していただいた明日香村教育委員会文化財課、川原寺の扇谷住職のご厚情に深く御礼申し上げます。川原寺の復元に関して御助言をいただいた、朝日放送の牟田口様、鳥取環境大学の浅川滋男教授に感謝いたします。

最後に学生生活を様々な面から支援していただいた両親と友人たちに、最大限の感謝の気持ちを表します。

平成 17 年 1 月 14 日

# 目 次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	3
1.2 本研究の目的	5
1.3 本論文の構成	6
第2章 関連研究	7
2.1 CGによる文化財の復元	9
2.2 拡張現実感に関する研究	13
2.2.1 拡張現実感の概要	13
2.2.2 構成機器	14
2.2.3 適用事例	17
2.2.4 屋外での事例	18
2.2.5 技術課題	18
2.3 影付けに関する研究	19
2.4 本研究の位置づけ	20
第3章 基礎画像を用いた陰影表現手法	22
3.1 光源環境の観察	24
3.1.1 シェーディング	25
3.1.2 影付け	27
3.1.3 拡張現実感での陰影表現に向けて	27
3.2 光源環境の近似	28
3.2.1 半球状面光源への近似	28
3.2.2 多面体面光源への近似	29
3.2.3 多面体平行光源への近似	30
3.3 オフライン処理	32
3.3.1 影付け平面の設定	33
3.3.2 光源の配置	35
3.3.3 基礎画像の生成	36
3.4 オンライン処理	39
3.4.1 輝度パラメータの計算	41
3.4.2 シーン内光源の設定	43
3.4.3 基礎画像の線形和	44
3.4.4 影付け平面へのマッピング	47
3.4.5 仮想物体の実画像への重ねこみ	47
第4章 実験対象	50
4.1 バーチャル川原寺プロジェクト	52

4.2 明日香村について	57
4.2.1 地理・風土	57
4.2.2 文化財	60
4.3 飛鳥時代の概要	63
4.3.1 飛鳥時代の政治	64
4.3.2 飛鳥時代の文化	65
4.4 川原寺について	66
4.4.1 創建年代諸説	66
4.3.2 沿革	70
4.3.3 発掘調査	72
4.3.4 川原寺の構成	73
4.4.5 復元案	77
4.5 復元 CG モデルの作成	80
4.5.1 モデリング作業	80
4.5.2 素材感の表現について	83
第5章 実験結果	86
5.1 使用機器	88
5.2 室内実験	94
5.3 屋外実験	101
5.3.1 基礎画像の生成	101
5.3.2 実験結果	103
5.3.3 処理の効率化に関する考察	106
第6章 結論	108
6.1 結論	110
6.1.1 基礎画像を用いた仮想物体の陰影表現手法の提案	110
6.1.2 屋外拡張現実システムの構築	111
6.2 今後の課題	111
6.2.1 影付け処理の効率化	112
6.2.2 太陽輝度の正確な取得	112
6.2.3 光学的整合性の実現	113
6.2.4 川原寺全体の復元	113

## 目 次

図 1 東大寺大仏の CG による復元.....	1 0
図 2 東大寺大仏殿の CG による復元.....	1 0
図 3 複合現実感の位置づけ.....	1 4
図 4 HMD による体感画像のイメージ.....	1 5
図 5 HMD の例.....	1 5
図 6 ビデオシースルー型 HMD の処理の流れ.....	1 6
図 7 シェーディングとシャドウイング（影付け）.....	2 5
図 8 反射光の成分.....	2 6
図 9 光源による影の違い.....	2 7
図 10 半球状の面光源.....	2 9
図 11 多面体上の面光源.....	3 0
図 12 各面中心からの平行光源.....	3 1
図 13 オフラインでの処理の流れ.....	3 2
図 14 影付け平面の仕組み.....	3 3
図 15 影付け平面による擬似的影表現.....	3 4
図 16 影付け平面の設置状況.....	3 5
図 17 平行光源の配置.....	3 6
図 18 基礎画像の生成シーン（地面）.....	3 7
図 19 基礎画像の生成シーン（中門二重南側壁面）.....	3 7
図 20 基礎画像の例（地表面）.....	3 8
図 21 オンラインでの処理の流れ.....	4 0
図 22 魚眼レンズ付きビデオカメラ.....	4 1
図 23 屋外環境における全方位画像の例.....	4 1
図 24 インデックス画像による全方位画像の分析.....	4 2
図 25 シーン内の光源.....	4 3
図 26 基礎画像と輝度パラメータによる線形和.....	4 4
図 27 基礎画像合成のフローチャート.....	4 6
図 28 影付け平面へのマッピング.....	4 7
図 29 合成領域の分類.....	4 8
図 30 合成処理の概念図.....	4 9
図 31 拡張現実感による復元展示.....	5 3
図 32 バーチャル川原寺プロジェクトのコンセプト.....	5 5
図 33 展示イメージ図.....	5 6
図 34 明日香村の位置.....	5 7
図 35 甘檜丘からの眺め.....	5 8

図 36 祝戸地区から北方向を望む.....	5 9
図 37 石舞台古墳.....	6 1
図 38 高松塚古墳.....	6 1
図 39 キトラ古墳.....	6 2
図 40 飛鳥寺跡.....	6 3
図 41 飛鳥時代の天皇在位期.....	6 9
図 42 現在の川原寺.....	7 1
図 43 川原寺伽藍配置図（奈良文化財研究所より提供）.....	7 8
図 44 中門立面図・平面図・高欄詳細図（奈良文化財研究所より提供）.....	7 9
図 45 参照資料とモデリング作業画面.....	8 0
図 46 川原寺復元 CG モデル（中門部分）.....	8 1
図 47 CG モデル細部の比較.....	8 2
図 48 古建築顔料による木版への塗装過程.....	8 3
図 49 晴天時屋外環境で撮影した塗装木版の画像.....	8 4
図 50 実験風景.....	8 8
図 51 HMD（キヤノン VH-2002）の外観.....	8 9
図 52 ビデオシースルー型 HMD の仕様（キヤノン VH-2002）.....	8 9
図 53 MR Platform の外観.....	9 0
図 54 PC のスペック.....	9 0
図 55 機材配線図.....	9 1
図 56 磁気センサのキャリブレーション.....	9 2
図 57 3-CCD カラービデオカメラ仕様（Victor KY-F57）.....	9 3
図 62 室内での実験風景.....	9 4
図 63 ビデオカメラの設置状況.....	9 4
図 64 ボックス型オブジェクトの基礎画像（地表面）.....	9 5
図 65 シェーディング・影付け効果の比較.....	9 7
図 66 視点固定・光源移動の場合.....	9 9
図 67 光源固定・視点移動の場合（遠景）.....	1 0 0
図 68 影付け平面の有効枚数.....	1 0 2
図 69 地面の基礎画像.....	1 0 2
図 70 実験用モデルの詳細.....	1 0 3
図 71 現地での実験風景.....	1 0 3
図 72 影付けの効果比較.....	1 0 4
図 73 時間の経過による影の移り変わり.....	1 0 5
図 74 基礎画像枚数と合成処理時間の関係.....	1 0 6

# 第 1 章 序論

飛ぶ鳥の 明日香の里を 置きて去なば  
君があたりは 見えずかもあらむ

『万葉集 卷 1-78』

# 第1章 序論

序章では、まず本研究の背景を説明する。近年のコンピュータグラフィックス(CG: Computer Graphics)技術の発展と文化財復元への応用、また仮想現実感(VR: Virtual Reality)の分野における拡張現実感(AR: Augmented Reality)の新たな展開をふまえて、バーチャル川原寺プロジェクトの説明を行う。次に本論文の目指す目的と研究の到達点を示した後に、論文の構成について述べる。

## 1.1 本研究の背景

近年、科学技術の進歩によりCGによる文化財の復元が可能となった。発掘調査や文献資料などの情報をもとに、世界各地の様々な遺跡で文化遺産の電子化や仮想的な復元が盛んに行われている。CGによって構築された仮想世界では、自由な視点から対象を観察したり、モデルに対して種々のシミュレーションを行うことが可能である。また従来の図面や模型による復元では困難であったアニメーションの制作も容易に行うことができる。最近では計算機の処理能力の向上とレンダリング技術の発展により、企業と大学・研究機関が中心となって非常に現実感の高い復元CGの製作が行われるようになった。完成した映像はテレビ番組や博物館の展示物として一般に公開されるほか、立体視が可能なVRシアターなどで鑑賞することができる。

一方でVRの分野における新たなトピックとして、拡張現実感技術が注目を浴びている。拡張現実感とは、CGで描かれた仮想環境を現実環境に合成表示することによって、現実世界に情報を付加する技術である。つまり従来研究されてきた仮想現実感が完全な仮想世界での没入体験を提供することに対し、拡張現実感では現実世界を基準に仮想物体を重ね込むことによって、作業訓練や景観シミュレーションを行

うことを目的としている。そのほかにも拡張現実システムの適用例としては、観光地でのナビゲーションや美術館での注釈表示、また機器の製造・保守や医療分野における作業支援などが挙げられ、今後はさらにゲームやアミューズメントなどエンターテイメントへの応用も期待されている。

CGによる文化財の復元は、ハードウェアの進化や計算手法の改良によって、今後ますます盛んになっていくと考えられる。レンダリング画像は現実に迫る写実性を獲得し、さらに精密で大規模な復元が行われることであろう。

しかし一方で、作成した画像やムービーをいかなる媒体で体験するかという問題が新たに生じている。CGアニメーションをテレビやモニターの画面上で観賞するのは迫力に欠けるが、コンテンツの上映のために巨大なVRシアターを準備するにも多大な手間とコストが必要とされる。またインターネット上での配布に関しては圧縮によって映像データの品質を落とすことが要求され、VRML[1]やJava3D[2]などで提供されてきたWeb3Dの枠組みも、ブラウザ上で手軽に3次元データを閲覧するにはまだまだ技術的な課題が多く残されている。そのため、手間隙をかけて制作した復元CG作品や、各地の文化遺産データを集積した有益なデジタルアーカイブなどが、一般の人々の目に触れることのないまま埋もれてしまっているという現状がある。

そこで最近では拡張現実感の長所を生かして、屋外の遺跡でそのまま復元CGを体験できるようなアプリケーションの開発が行われてきている。拡張現実システムを用いれば、遺跡現地で物理的な複製を作る必要もなく、またCGアニメーションの上映のために大掛かりな装置も必要ではないなど、様々なメリットが考えられる。特に近年ではウェアラブルコンピュータとの融合により、背中に背負える程度の機材で自由に敷地を歩き回りながら、実寸スケールで表示される復元CGを眺めるというような展示方法が可能になってきている。またすでに建造物の失われてしまった遺跡などでは、臨場感溢れる復元CGを実際に現地で重ね合わせて見られるため、一般観光客への学習効果や集客・宣伝効果も期待されている。

## 1.2 本研究の目的

以上の背景をふまえて、本研究では奈良県明日香村川原寺跡を対象に、拡張現実感による遺跡現地での文化財建築の復元展示を試みる。さらに拡張現実感における重要な技術課題である仮想物体と実画像の光学的整合性の実現に向けて、実時間での高速な陰影付け手法を提案する。

川原寺遺跡は飛鳥4大寺の一つに数えられる歴史上重要な建築文化財であるが、現在では主要な建物は失われ、わずかに基壇と礎石の一部を残すのみである。そこでCGによる伽藍の復元を行い、さらに現地で拡張現実感システムによる展示を目的として、筆者らはバーチャル川原寺プロジェクトを進めている。このプロジェクトは屋外での遺跡における、大規模な拡張現実システムの開発を目的としている。今回対象となる川原寺跡以外にも、明日香村近辺には同様の遺跡が数多く存在し、奈良県内、国内はもとより海外にも目を向ければ、研究の成果を適用できる対象は無数に存在すると考えられる。今日多くの文化遺産は、貴重な文化財の保存と観光客への効果的な展示サービスという、相対する要求を抱えており、拡張現実感による展示は両者の要求を効果的に満たす手段として期待されている。

しかしながら屋外での大規模な拡張現実アプリケーションには、仮想物体と実画像の位置合わせや、シェーディング・影付けなど光学的整合性の向上など、依然として多く技術的な課題が残されている。そこで本論文では、バーチャル川原寺プロジェクトの一環として特にCG物体の陰影付けに着目し、合成画像の現実感向上のための実時間影付け手法を提案する。提案手法では、前処理段階であらかじめ生成しておいた画像セットを用いることによって、刻々と変化する光源環境下で高速に仮想物体のソフトシャドウを生成し、現実感の高い合成画像を生成することが可能である。

## 1.3 本論文の構成

本論文ではまず第2章で本研究の関連研究について述べる。次に第3章では基礎画像を用いた実時間陰影表現手法を提案する。第4章では本論文の母体となるバーチャル川原寺プロジェクトを紹介し、実験対象となる川原寺の背景を述べ復元CGモデルの作成過程について説明する。そして第5章では使用機器の説明と室内および現地屋外における実験結果を示す。最後に、第6章で結論と今後の課題を述べる。

## 第 2 章 関連研究

采女の 袖吹き返す 明日香風  
京を遠み いたづらに吹く

『万葉集 卷 1-51』

## 第2章 関連研究

本章では、本論文と関連の深いCGと拡張現実感の2つの分野の関連研究を紹介する。まずCGによる文化遺産の復元事例を挙げ、その背景と最近の動向を概観する。次に拡張現実感の概念と適用事例を説明し、特に本研究と類似の形式をもつ屋外での事例について触れる。最後に拡張現実における技術的な課題を示し、CG分野における取り組みを紹介したあとに、本研究の位置づけについて述べる。

### 2.1 CGによる文化財の復元

従来、失われた文化財の復元には図面や模型などの手段が用いられてきた。また時には、遺跡現地にて建築物などの実物大の複製が作られることもある[3][4]。

しかし近年、科学技術の進歩により、まったく新しい文化財の復元方法が可能になった。3次元のCGを用いることによって、精巧な合成画像や迫力ある映像をモニターの上、あるいは劇場の巨大スクリーン上で表現することができる。

以下の画像は東大寺の大仏および大仏殿のCGによる復元イメージである[5]。高精度なレーザーレンジセンサ装置を用いて実物体の3次元形状を取得し、さらに文献資料などのデータを参考にして、天平時代の大仏の姿を復元したものである。迫力あるアニメーション映像によって、復元された壮大な伽藍の内部を体験することができる。



図 1 東大寺大仏の CG による復元



図 2 東大寺大仏殿の CG による復元

CGによる文化財復元は、従来の図面や模型による復元に比べて、以下の点でメリットがあると考えられる。

- 1. 実寸大の複製を作る場合よりも、コストを低く抑えられる**
- 2. 何度でもやり直しがきく・失敗・変更のリスクが少ない**
- 3. アニメーションなどの新しい表現手法が使用できる**

まず失われた文化財を実際に復元する場合は、綿密な発掘調査と材料・工法や意匠・構造の研究が行われる。平城宮朱雀門のケースでは、研究と建設工事にそれぞれ10年もの期間を費やしている[3]。これに比べてCGでの復元コンテンツを制作する場合には、CADソフトなどによるモデリングやレンダリング作業が中心となり、実物の復元工事に比べれば、低コスト・短期間で成果を上げられると考えられる。

またCGによる復元においては、データの修正や変更を容易に行うことが可能である。そのため発掘調査や歴史研究によって修正案の変更が迫られる場合でも、従来のように物理的に復元を行うことに比べればスムーズに対応することができる。

さらにこれまでの図面や模型などの復元手法では困難であったアニメーションの制作や物理的なシミュレーションも、CGで構築された仮想世界内では容易に行うことが可能となった。例えば仮想的に構築された都市空間や建築物を対象に、上空から俯瞰しながら回転したり内部を自由に歩き回るといったような映像が、大量のセル画を1コマ1コマ手作業で制作する必要なしに、カメラパスを設定することによって自動的に生成できるようになった。特にCGによる写実的な復元映像は、エンターテインメント性をそなえた新たな表現手法として注目を浴びている。

CGの歴史について概観すると、その起源は1962年のI. E. Sutherlandによるスケッチパッドシステム[6]にあるといわれている。そこではCGの出力装置としてブラウン管を利用し、対話形式で簡単なグラフィックス図形を扱うことができた。その後、1960年代初頭にはアメリカのベル研究所において、人工衛星の姿勢制御など宇宙開発のシミュレーションにCGが利用された。1970年代にはテレビや映画の特撮場面にCGが利用されるようになり、映画「スターウォーズ」やNASAの衛星フライトシミュレーションなどによってCG技術は実用化の域に達した。1973年にはACM

SIGGRAPH(Association for Computer Machinery Special Interest Group on Graphics)が創設され、CGに関する様々な表現アルゴリズムの研究が隆盛を極め、現在に続いている。1980年代、CGは本格的な普及をはじめ、映画「トロン」においてCGブームを巻き起こし、日本にもJCGLやリンクスのようなCGプロダクションが誕生した。その後、超LSIの出現や画像処理技術の進歩により、安価で高性能なグラフィックス・ワークステーションが普及し、パーソナルコンピュータのグラフィックス機能の飛躍的な向上にもなって、誰もが手軽にCG作品を制作できる状況になった[7][8]。

近年では様々な分野でCGが応用されている。CAD分野においては機械部品、電気製品などの形状設計が、航空、自動車、建設といったあらゆる産業において実用化され、最近では照明設計にも応用されるようになった。またエンターテインメント分野においては、アニメーション、テレビコマーシャル、番組タイトルに応用されている。教育訓練の分野では、フライトシミュレータ、CAIに応用され、サイエンティフィックビジュアライゼーションとして有限要素解析結果の視覚化や、流体、数式の視覚化も盛んに行われている。また自然物の表示としては、フラクタルによる山岳地形の形成や、惑星、木、森、植物、雲、海の波など、様々な表現が試みられている。このようにして、現在ではCGによってつくられた映像を映画やテレビコマーシャルのなかで日常的に目にするようになり、CG技術は広く一般に浸透していると考えられる。

そして近年、このCG技術を文化財の復元に応用しようと試みが盛んに行われるようになってきた。これまでに世界各地の様々な遺跡を対象に、CGによる復元イメージが提示されてきている。近年国内で話題になった事例としては、世界の古代都市の再現[9][10]や、二条城や紫禁城の仮想現実化[11]、マヤ文明コパン遺跡のVR化[12]などが挙げられる。これらの企業や大学の研究室が取り組む大掛かりな復元プロジェクトでは、計算機の処理能力の向上やモデリングツールの改良、レンダリング方法の進歩によって、ますます写実的で迫真に迫る映像が生み出されるようになってきている。

## 2.2 拡張現実感に関する研究

### 2.2.1 拡張現実感の概要

さらに近年、VRの分野における新たなトピックとして、拡張現実感(AR: Augmented Reality)、あるいは複合現実感(MR: Mixed Reality)と呼ばれる技術が注目されている[13][14]。これはヘッドマウントディスプレイ(HMD: Head Mounted Display)の画面上において実世界の画像と仮想物体を合成表示することにより、あたかも現実世界に仮想物体がそのまま出現したかのように見せる技術である。現実世界と仮想世界をシームレスに融合させ、現実世界の情報の豊かさと仮想世界の柔軟性を兼ね備えた視覚世界を実時間に提供することができる。従来研究されてきた仮想現実感、現実環境では不可能な体験を擬似的に表現することを可能にしたが、CGのみから構成される仮想空間の臨場感や写実性には限界がある。そこで現実環境はそのままユーザーに提示し、そこに必要な仮想環境を合成する拡張現実への要求が高まってきている。

拡張現実感とはその名の通り、我々が住む現実の世界を電子的なデータによって”Argument”(増強・添加)するという意味に捉えられる。VRがコンピュータ内に構築された仮想世界での対話的な作業を行うことに対して、拡張現実感は基本的に現実世界に立脚して、そこに仮想の事物を付加するという性格をもつ。そのため仮想世界にはまり込んでしまい、現実世界に適応できなくなるというような心配が少なくないと言われている[15]。

特に拡張現実感システムにとって不可欠ともいえる3次元表示装置のHMDの使用に関しては、ユーザーの全視野を覆う遮蔽型ではなく自分の手元、足元が見えるシースルー型を用いることから、事故や怪我の危険性を軽減できるという点もメリットの一つに数えられている。

また拡張現実感の一つの適応例として、机やドアなどに一種の知的な処理能力が具わったかのように見せることも可能である。このように拡張現実感の「実世界を情報的に強化する」というコンセプトは、広い意味ではM. Weiserの提唱する「偏在型コンピューティング」(Ubiquitous Computing)[16]とも深い関連性をもっていると考えられる。

一方、複合現実感とは1990年代にP. Milgramによって提唱された概念である[17]。

Milgram の考えでは，拡張現実感に対置する概念として Augmented Virtuality が挙げられており，こちらはコンピュータ内に構築された仮想世界を，我々の実在する現実世界の情報で強化するという概念である．両者の境界は定かではなくスペクトル的に連続であり，その全体 (Virtuality Continuum) を扱うのが複合現実であるといわれている．

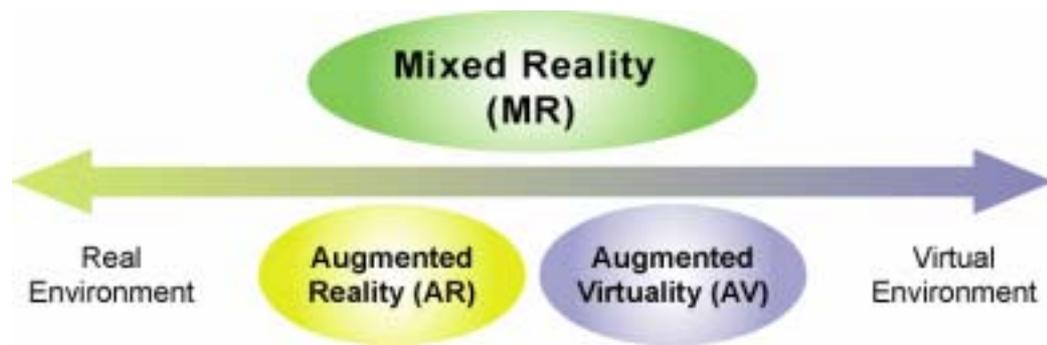


図 3 複合現実感の位置づけ

拡張現実感の，現実世界を基準に考えるという視点は，ユビキタスコンピューティングとともに情報科学分野における新しい動向として，様々な応用の可能性が期待されている．

### 2.2.2 構成機器

拡張現実システムで使用される HMD とは一般に左右両眼に対応する 2 台の小型画像表示装置を内蔵した頭部装着型ディスプレイのことを指し，その起源は 1970 年に発表された I. E. Sutherland のプロトタイプ [18] にさかのぼる．現在では液晶モニターや自由曲面プリズムの利用により小型化が進み，眼鏡をかけるように手軽に利用できることからフェイスマウントディスプレイ (FMD: Face Mounted Display) と呼ばれるものも開発されている．さらにジャイロや磁気センサーなどの位置検出装置によって視線方向を計測することによって，臨場感溢れる仮想世界を表現することが可能となった．

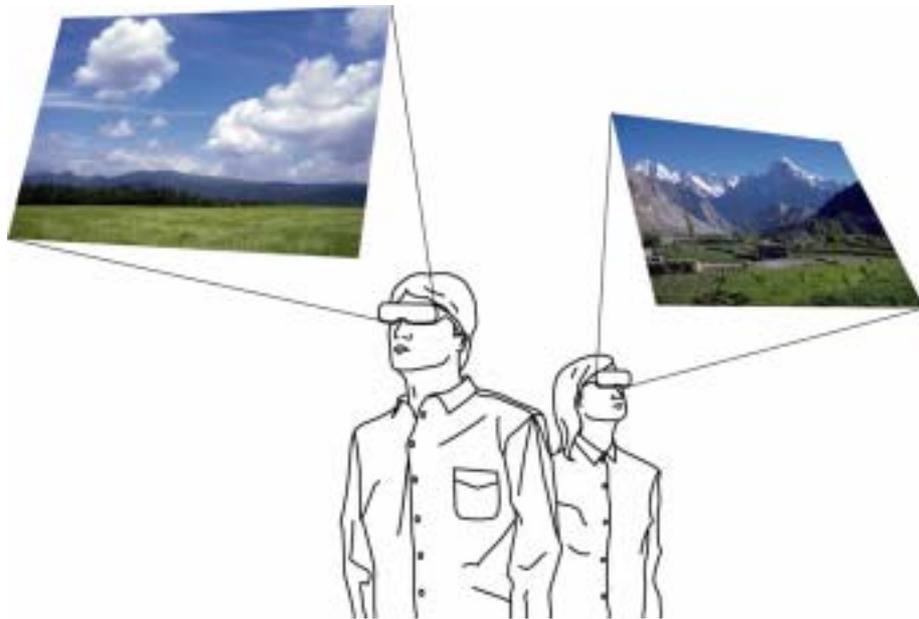
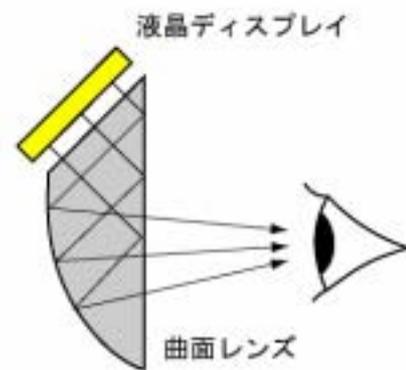


図 4 HMD による体感画像のイメージ

現在制作されている HMD のうち、ウェアラブル用途に使用される小型のものを挙げると、島津製作所” Data Glass 2” [19]，三菱電機” SCOP0” [20]などがあり，また眼鏡に装着可能な程度の超小型のものでは Micro Optical[21]，eyetop[22]，さらに網膜にレーザー光線を直接照射して画像を浮かび上がらせる特殊タイプとして MCROVISION の” NOMAD” [23]が挙げられる。



HMD (キヤノン VH-2002)



ディスプレイ部分の構造

図 5 HMD の例

拡張現実システムで使用されるHMDはCG画像と実写画像の合成方法によって次の2つのタイプに分けられる.

- **光学シースルー(Optical See-Through)方式**
- **ビデオシースルー(Video See-Through)方式**

それぞれの原理と特徴を述べると、前者は現実空間をハーフミラーで直接見て、仮想空間と重ね合わせる方式であり、実時間で安定して動作するという特徴があるが、仮想物体による現実物体の遮蔽が困難であり、ハーフミラーを用いるために現実環境が若干暗く見え、仮想物体が半透明に見えるなどの短所がある.

一方後者の方式は、現実空間をビデオカメラで撮影して仮想世界と合成したあとにディスプレイに表示するものである. 実写画像を一旦コンピュータに取り込んでから合成処理を施すため、シームレスな重ねあわせには有利であるが、処理の遅延によって、船酔いや宇宙酔いのような空間意識失調症に近いVR酔いをユーザが感じる恐れがある. また電源が切れた場合に画面が真っ暗になるという欠点もある.

なお本研究では、拡張現実感の合成画像における現実性の向上を目指すため、実画像の画像処理を行うことができるビデオシースルー型のHMDを採用している.

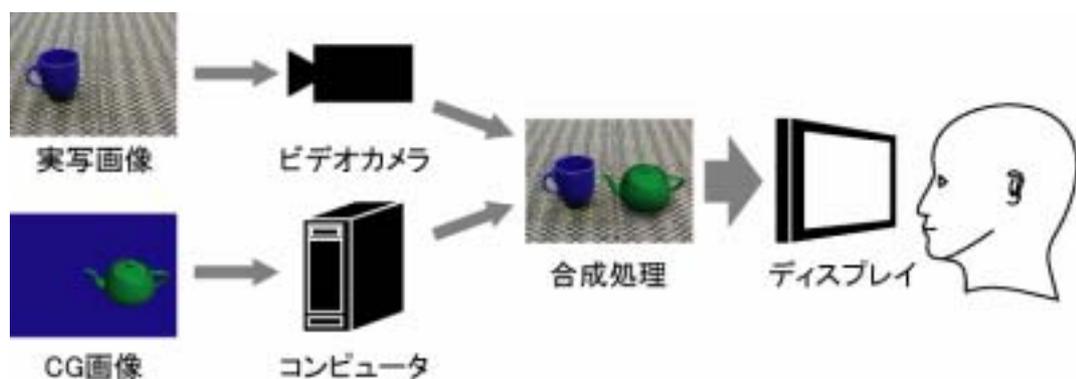


図 6 ビデオシースルー型 HMD の処理の流れ

### 2.2.3 適用事例

現在、様々な分野で拡張現実感の応用が行われているが、利用目的の観点から次のように大まかに分類することができる。

#### 1. 機器製造工程，保守作業における作業支援

拡張現実感の先進的な例としてはコロンビア大学の KARMA[24]が挙げられる。このシステムはレーザプリンタのメンテナンス支援を目的としており、対象となる実物体の主要なパーツにあらかじめ3次元トラッカーを設置しておくことによって、各パーツの位置と方向を検出し、目的の作業を行うための情報をHMDに表示する仕組みになっている。その他にすでに実用化されている例としては、ボーイング社における航空機のワイヤーハーネス製造への導入[25]などが挙げられる。ここでは迷路のように入り組んだ配線図の中から必要な配線だけをHMDにピックアップ表示することで、作業の効率化が図られている。

#### 2. 注釈・情報提示によるナビゲーション

2の分野における例としてはSony CSLが開発したNaviCam[26]が挙げられる。このシステムでは実世界のバーコードを手がかりに、計算機内に蓄えられた対応する情報を提示するようになっている。ディスプレイ部はビデオシースルー型を採用し、可搬性にすぐれた携帯型コンピュータによって構成されている。

#### 3. 診断・手術など医療分野への応用

MRI (Magnetic Resonance Imaging)やCT(Computer Tomography)から得られた3次元画像を手術中の患部画像に合成したり、手術シミュレーションなどに利用されている[27]。

#### 4. 建築，都市計画分野での景観シミュレーション

飛鳥建設の東北新幹線八甲田トンネルへの適応例[28]などが挙げられる。建築，都市計画分野では、建設作業現場での設計案の表示などにとどまらず、従来都市空間で建築物やネオンライトが担ってきた文字情報やグラフィック情報を代替するツールとして、ありとあらゆる注釈情報を描き出す汎用的な利用

法が期待されている[29].

## 5. ゲームなどエンターテイメントへの応用

HMDを通してキャラクタを重畳表示することなどによって、現実世界を舞台に臨場感溢れるゲーム空間を体験することができる。大型の映像投影装置を必要とせずに迫力ある仮想空間を表現できるため、様々なアトラクションへの応用が期待されている[30][31].

本研究におけるアプリケーションは文化財の拡張現実システムによる復元表示を目的としているため、観光地での案内表示システムと景観シミュレーションを合わせたものと位置づけることができる。

### 2.2.4 屋外での事例

近年、デバイスの小型化と計算機の処理能力向上により、ウェアラブル・コンピュータの研究が盛んに行われている。機器のサイズや消費電力を縮小することによって、デバイスを腰に装着したり、服に縫い付けたりして自由に歩き回ることが可能である。またディスプレイ部分には通常 HMD が使用されるため拡張現実感との親和性が高く、ノート PC を背中に背負う程度の装備で屋外での拡張現実アプリケーションが可能になってきている[32].

屋外での仮想物体表示が可能となることによって、観光地でのナビゲーションを兼ねた文化財の復元展示を行うことができる。現在このような試みが行われている事例としては、天目らの平城宮跡のナビゲーションシステム[33]や、H. Schnadelbach らによるノッティンガム城の復元[34]、ギリシャ遺跡の復元[35]、ポンペイ遺跡における人々の生活の再現[36]などが挙げられる。

その他にエンターテイメント性を重視した、屋外体験型ゲームへの応用も行われている[37][38].

### 2.2.5 技術課題

以上のように拡張現実感の応用範囲は多岐にわたるが、違和感のない拡張現実環境を構築するためには、現実環境と仮想環境の融合において、以下に示す整合性を満

たす必要があると考えられている[39].

- **幾何学的整合性**

現実環境と仮想環境の3次元空間上の位置・姿勢を一致させること

- **光学的整合性**

仮想環境の照明位置や陰影などを現実環境と一致させること

- **時間的整合性**

仮想環境の描画にかかる時間的な遅延をなくすこと

幾何学的整合性の実現についてこれまでに提案されている手法は、観察者の視点の位置・方向を検出するために、磁気や超音波などの3次元位置センサを用いる手法[40]、ビジョンセンサを用いる手法[41]、また複数のセンサを組み合わせる手法[42]などが挙げられる。

また光学的整合性の実現については、仮想物体の陰影が実物体と一致し、さらに仮想物体の影が実物体に落とされる必要がある。しかし直接光と間接光を含む現実世界の光源を正確に取得し、仮想物体の陰影付けに反映させることは容易ではない。光学的整合性の向上のためにこれまで提案されている手法は、カメラを用いて実世界の光源環境を直接計測する手法[43][44][45]、間接的に入力画像中の実物体の陰影から光源環境を推定する方法[46]などが挙げられる。

時間的整合性の実現については、仮想物体を描画し実画像と合成するための処理時間を短縮することが、なによりの課題である。しかし一般に仮想物体のレンダリングなどに関して、画像の質と処理速度はトレードオフの関係にあるため、現実感の高い合成画像を生成しながら、なおかつ実時間で高速に処理できるような手法の開発が求められている。

## 2.3 影付けに関する研究

一方、CGの分野でも高速に現実感の高いソフトシャドウを表現する手法が提案されている[47][48][49]。これらの手法では効率的に写実性の高い影付けを行うことが

できるが、拡張現実システムにおいて刻々と移り変わる実光源環境に対応した影付けを行うことは想定されていない。

そこで佐藤らは、実時間で実光源環境を計測しながら仮想物体から実画像への自然な影付けを行う手法を提案している[50]。佐藤らは拡張現実感の概念を念頭におき、仮想物体と実画像の合成画像中において現実世界に出現した仮想物体が、現実の床や地面に仮想的な影を落とすことを可能にしている。佐藤らの提案手法における特徴的なポイントは、光源輝度と物体表面の明るさの関係の線形性を利用することにより、拡張現実の合成処理で最も時間のかかる仮想物体のレンダリングをオフラインで行うということである。そしてオンラインの処理ではこれらのあらかじめレンダリングされた画像を用いて、実光源環境を逐次計測しながらそのときの状況にふさわしい影を実時間で表現する。これによって、仮想物体の陰影を生成するレンダリングアルゴリズムに時間的な制約がかからず、物体間の相互反射なども考慮に入れた現実感の高い合成画像を高速に生成することができるとされている。

しかしながら、佐藤らの手法は固定された視点を対象としているため、観察者が任意に視点を移動できる拡張現実システムには適用できない。また仮想物体の特定の位置における影を用いるため、物体の位置姿勢が変化するシーンには対応できない。

## 2.4 本研究の位置づけ

本研究では拡張現実システムにおける仮想物体と実画像の光学的整合性を実現するため、仮想物体の実時間陰影付け手法を提案する。提案手法では上記の佐藤らの手法を拡張し、合成後の影画像を3次元空間上の任意の場所に設置した影付け用平面にテクスチャマッピングすることにより、任意の視点移動に対応可能な枠組みを提供する。さらに外部の光源環境を魚眼レンズ付カメラで撮影し、輝度の分布を調べたあとに仮想シーンのライティングと影の合成処理に反映させるため、実光源環境に対応した仮想物体のシェーディング・影付けを行うことが可能である。その際仮想物体の影を地面や他の物体に投影するだけでなく、仮想物体自身のセルフシャドウも表現できることが、本手法の特徴である。

提案手法は、建築物のような静止物体に対して前処理段階で影付け用の基礎画像の生成を行う。そこで本論文では提案手法の適用例として、奈良県明日香村における

川原寺跡を対象に，文化財建築の拡張現実システムによる復元展示を行った．その結果，室内環境における仮実験や，現地での合成実験において，仮想物体表面の陰影を現実世界の光源環境に適合させ，仮想的な影を現実の地面に投影することにより，合成画像の現実感を向上させることができた．

## 第3章

# 基礎画像を用いた陰影表現手法

故郷の 飛鳥はあれど あきによし  
平城の明日香を 見らる好しも

『万葉集 卷6-992』

# 第3章

## 基礎画像を用いた陰影表現手法

本章では提案する手法の基礎となる考えを説明し、仮想物体と実画像を合成するまでの処理の流れを述べる。まず光源環境の観察から、直接光と間接光の区別について説明し、CGにおける物体のシェーディングと影付けの要点を述べる。次に観察によって得られた知見をもとに、光源環境を近似する方法について解説する。

提案手法の特徴は、前処理段階であらかじめ生成しておいた基礎画像を用いることによって、刻々と変化する光源環境下で高速に仮想物体のソフトシャドウを生成し、現実感の高い合成画像を生成するという点にある。そこで、あらかじめ複数の光源からレンダリングした影の画像を基礎画像として用意するオフライン処理の部分と、拡張現実システムで実時間に行うオンライン処理の部分に分けて説明を行う。

### 3.1 光源環境の観察

現実世界の光源環境は、太陽や照明などの直接光だけでなく、壁や地面からの相互反射による寄与分も間接光として考慮する必要がある。間接光の影響は、物体の陰影や影となる部分に見ることができる。例えば通常我々が目にする、照明のついた室内や太陽の照らす屋外では、物体の影になる部分が完全に真っ暗になるということはありません。その理由は、室内ならば壁や天井、床などの平面、屋外ならば地面や建物の壁面などから反射された光が、物体の影の部分にまわり込むからである。

また、偏に光源といっても、現実世界で光を照射する事物の形状は様々である。通

常 CG の世界では、点光源・平行光源・線光源・面光源など、多様な光源モデルが開発されている。実世界の光源を仮想世界で表現する場合、室内における白熱灯は点光源、蛍光灯は線光源などで近似できるであろう。また屋外における太陽は平行光源、その他の天空からの影響は面光源と考えることができる。しかし厳密には光源はある程度の大きさをもった実体であり、物体が光源を遮蔽して影を生成する場合には、物体によって光源の一部分だけが遮蔽された領域が存在する。これによって日常我々が目にする影は、境界部分が若干ぼやけたソフトシャドウとなっている。

CG で構成された仮想空間内で物体の影付けを行う場合、見た目の現実感を向上させるには、上記の間接光の影響と、光源そのものの大きさを考慮することが重要となる。ここではまず、光の当たり具合によって物体表面の濃淡が変化する状態を意味するシェーディングと、物体によって光が遮られ、他の物体に落とされる影を意味する影付けについて、間接光と光源の大きさを考慮した場合に生じる効果についてそれぞれ観察する。

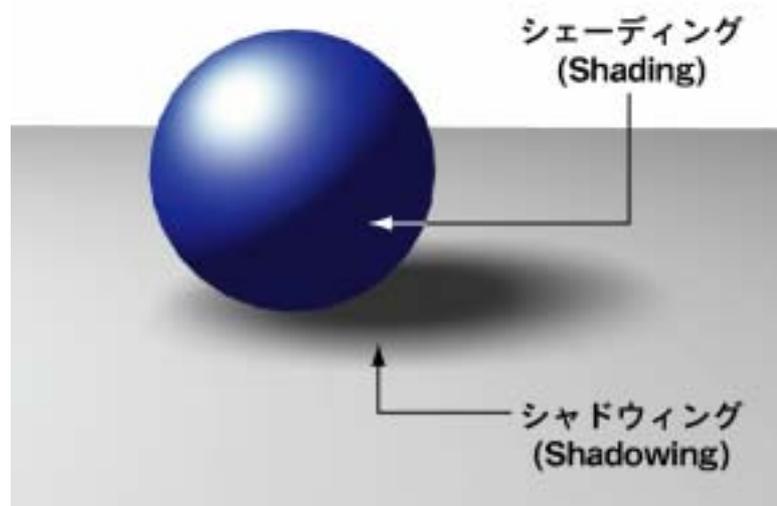


図 7 シェーディングとシャドウィング（影付け）

### 3.1.1 シェーディング

3次元物体の陰影表示のために採用する光の物理モデルをシェーディングモデルという。シェーディングモデルを構成する要素は、物体を照射する光源の種類およびそれらの特性、物体を照射する光の種類(直接光と間接光)、さらに反射・透過・屈

折などの物体の性質などが考えられる。

一般的な CG におけるシェーディングモデルでは、被照面の反射光を環境光・拡散反射光・鏡面反射光の 3 つの成分からなるものとみなしている。このうち環境光は間接光による影響を考慮したもので、光源の物体表面への入射角に関係なくいずれの方向にも同じ強さで反射し、画面全体に一定の明るさを与えるものである。一方、拡散反射光は表面から入射した光が物質内で多重散乱したあと表面に現れた光を表し、平行光源などに対しては反射光の強さは入射角の余弦に比例することが知られている。最後に鏡面反射光とは物質表面での直接反射によって生じるもので、入射角と反射角が等しい正反射の方向に最も強く反射されるハイライトを生じるものである。

環境光は物体間の相互反射を簡易的に表現するもので、単純にすべての面の明るさを均一に増加させるものであるが、その他にも直射光によって照射される面から反射する 2 次反射光以上の相互反射を計算するなどの、より精密なモデルが開発されている。

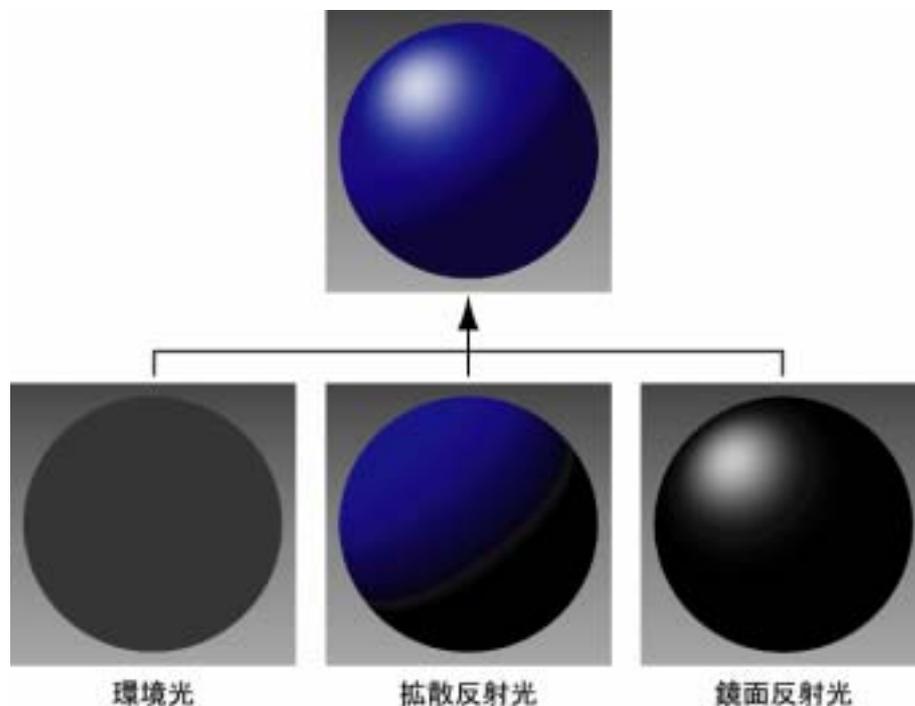


図 8 反射光の成分

### 3.1.2 影付け

物体表面の光の濃淡を表現するシェーディングに対して、物体によって生じる影を表現することを影付け(影付け)という。影は物体の高さや相互の位置関係を示すために重要な役割を果たし、写実的なCG表現にとって欠かせないものである。

一般に物体の影は本影と半影の2種類に分けられると考えられている。本影とは光源からの直接光がまったく当たらない部分を指し、平行光源や点光源のような、大きさをもたない光源によってつけられる影がこれに相当する。一方で、線光源や面光源などの大きさをもつ光源は、本影の周囲に光源の一部分のみによって照射された領域を生じる。これが半影と呼ばれ、本影の周囲に向かって次第に弱まっていくようなソフトシャドウとして観察される。

また本影部分において、影を受ける対象となる物体表面も間接光によって照射されるため、輝度がゼロになることはあまりない。そのため写実的な陰影付けを行う場合には、影付けにおける間接光の影響も考慮する必要がある。

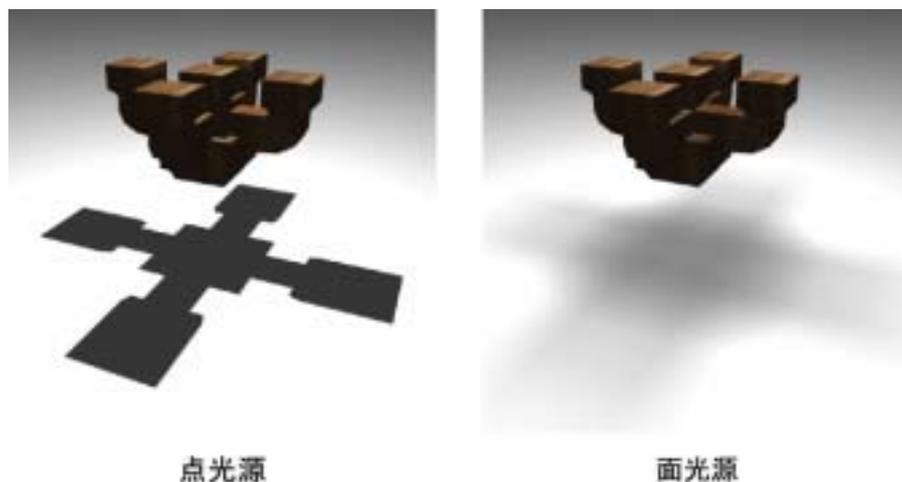


図 9 光源による影の違い

### 3.1.3 拡張現実感での陰影表現に向けて

以上述べたように、CGにおいて間接光と光源の大きさを考慮することは、レンダリング画像の写実性を向上させる上で不可欠の要素であることがわかる。さらに本研究では、生成したCG画像をビデオカメラによって取得した実画像と合成することから、現実に反した不自然な影付けは非常に目だってしまう。最終的には拡張現実

感で合成した仮想物体が、あたかもその場にあるかのような現実感を実現することが目的であるため、仮想物体に対して実光源環境を的確に反映したシェーディング・影付けを行うことは必須の条件である。

一方で考慮すべき点は、拡張現実システムにおいてはCG画像の生成と実画像との合成処理は、実時間で行わなければならないということである。現実世界における観察者の視点の移動に対する時間遅延は、合成画像に違和感を生じ、現実感を著しく損ねることは、第2章で述べたとおりである。そのため本研究においては、間接光による影響を考慮した柔らかい影付けを行いながら、なおかつ実時間に近い高速で処理を行うことが目標である。しかしながら、CGの分野においては面光源の計算やラジオシティ法によるレンダリングは、通例多大な時間がかかるため、拡張現実システムにおいてそのままの形で実装することは困難を極める。

## 3.2 光源環境の近似

本論文では、実光源環境をほぼ均等に分割された面光源の集合と近似し、各面光源ごとにあらかじめ物体の影を表現する基礎画像を生成しておくことで、極めて高速にソフトシャドウの表現が可能な手法を提案する。ここでは提案手法のもととなる光源近似の考え方について説明する。

### 3.2.1 半球状面光源への近似

まず屋外での光源環境を、次の図10のように点Aを覆う半球状の面光源と考える。ここで中心点Aは地表面上に位置すると仮定し、下方向からの光源の寄与分は考慮しない。この半球状面光源は、太陽と天空からの直接光と建物や地面に相互反射して入射してくる間接光の、すべての光を含むものである。

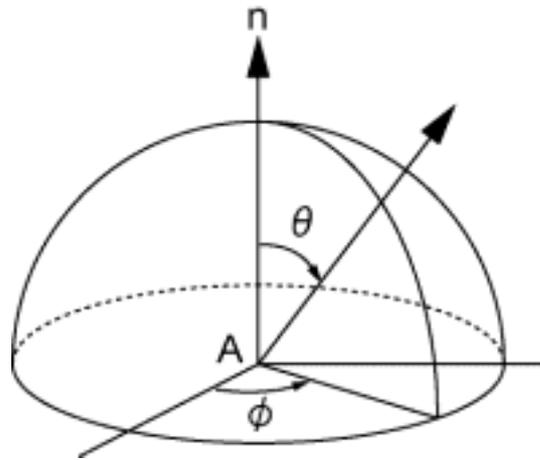


図 10 半球状の面光源

このモデルにおいて、中心点 A から、 $(\theta_i, \phi_i)$  の方向に存在し、微小角度  $\delta\theta$  と  $\delta\phi$  に対応する微小領域を考えると、面光源全体から点 A への照度 E は式(1)のような 2 重積分により求めることができる。

$$E = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_0(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (3.1)$$

ここで、 $L_0(\theta_i, \phi_i)$  は  $(\theta_i, \phi_i)$  方向からの、単位立体角あたりの輝度を表し、 $\cos \theta_i$  は照射角度による光源輝度の減衰を示すパラメータである。

### 3.2.2 多面体面光源への近似

次に、図 11 のように半球状面光源を多面体で近似し、面方向へのサンプリングを行う。ここでは近似する多面体として、Geodesic dome の Class 1 D-2 を用いる。この多面体はほぼ面積の等しい 40 の三角形面から構成されるため、等密度でのサンプリングを行うのに好都合である。またこの段階で、多面体の頂点方向でなく、面内のすべての点からサンプリングを行うことによって、近似する多面体の面数が少ない場合でも近似の精度を上げることができる。

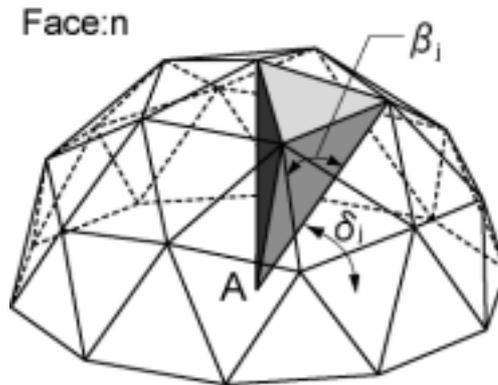


図 11 多面体上の面光源

しかしながら，面光源の計算には通常長い計算時間を必要とするため，計算コストの点から考えると，多面体の各面を面光源とみなすことは図 10 の半球状面光源を想定する場合とたいして変わりはない．そこで本論文では，特定の三角形面内において，入射方向による光源輝度の減衰を表す  $\cos \theta_i$  を三角形の中心点に対して計算し，面内のすべての点の減衰パラメータとして使用する．ここで中心点 A の照度 E は式 (2) のように表せる．

$$E = \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sum_{j=1}^p L_j \quad (3.2)$$

ここで  $L_j$  は単位立体角あたりの輝度を現し， $\cos \theta_i$  は面中心点の輝度減衰パラメータを示す． $p$  は各面の画素数であり， $n$  は多面体の面数を表す．図 11 の Geodesic dome の場合は  $n = 40$  である．この段階で，式 (1) で与えられる 2 重積分の項は，多面体の各面ごとの離散的な積分で近似することができるようになる．

### 3.2.3 多面体平行光源への近似

さらに計算効率を上げるため，本論文では多面体各面の面光源を図 12 のように面の中心から観測点 A に向かう平行光源の集合で近似する．

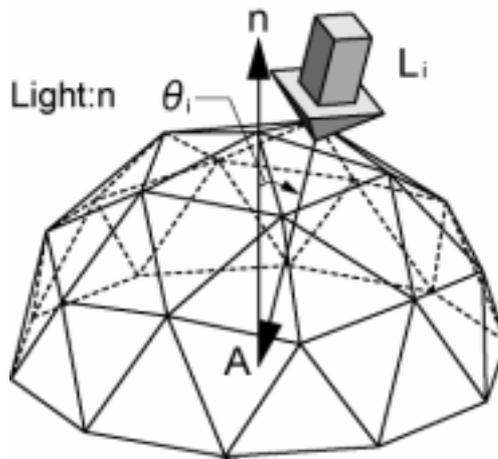


図 12 各面中心からの平行光源

現実世界の光源を分析する際には、多面体各面内のすべての点について輝度の計算を行うが、仮想世界の光源を面光源ではなく平行光源を用いることによって、正確な測定を行いながら効率的な照明効果が得られると考えられる。この段階で点 A の照度 E はさらに単純化され、式(3)のように表される。

$$E = \sum_{i=1}^n L_i \cos \theta_i \quad (3.3)$$

ここで、 $L_i$  は各面を代表する平行光源の強度を表す。以上の過程を経て、光源環境を半球状面光源から多面体各面の面光源に近似し、最終的には各面の中心から照射する平行光源の集合で表すことができるようになった。

### 3.3 オフライン処理

本節では提案手法における，前処理の部分について解説する．まず対象モデルの表面に影付け平面を設置する．次に前節で述べた光源環境の近似を用いて仮想世界に光源を配置し，各光源ごとにレンダリングを行うことにより，仮想物体の影をあらゆる基礎画像を作成する．オフラインでの処理の流れを次の図 13 で示し，以下順を追って説明する．

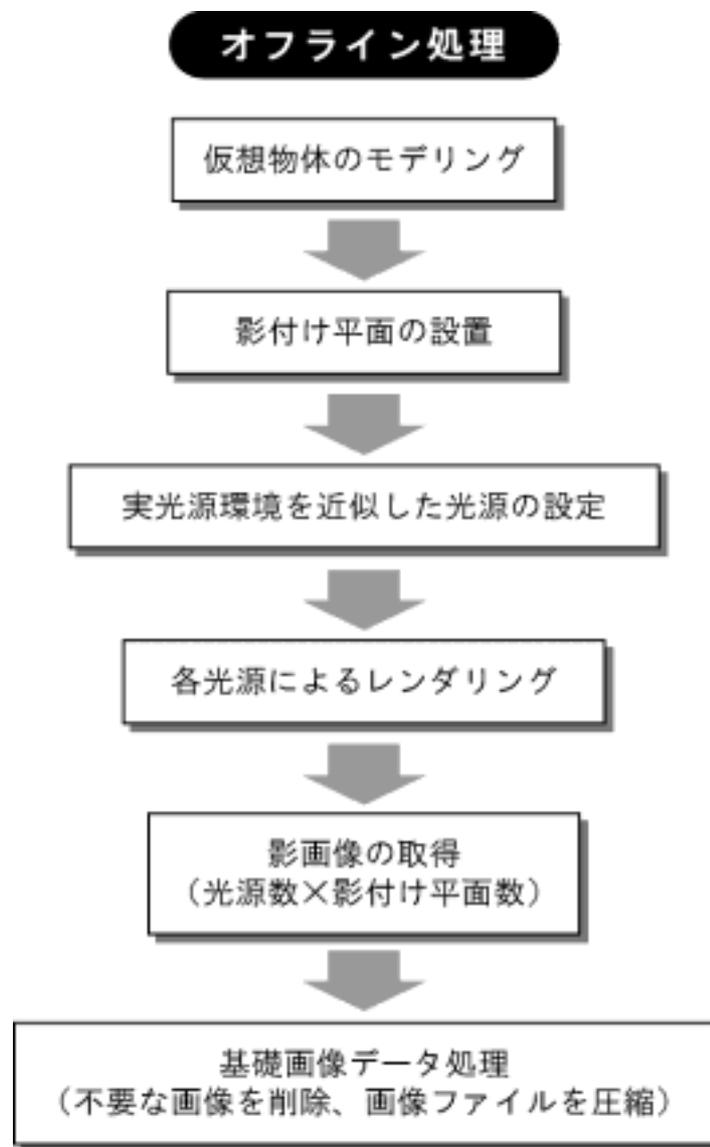


図 13 オフラインでの処理の流れ

### 3.3.1 影付け平面の設定

本論文では最終的に、取得した影の画像を CG モデル表面に設置した影付け平面にテクスチャマッピングすることによって、3次元空間でのモデルの影を表現する。しかし本研究の対象となる建築物は複雑な形状をもつ多数の部材から構成されており、すべての部材に対して個別に影を与えることは困難である。本研究では拡張現実システムでの実時間影付けを目指す目的から、各部材の影を一定のまとまりごとに1つの影付け平面で代表させることにした。

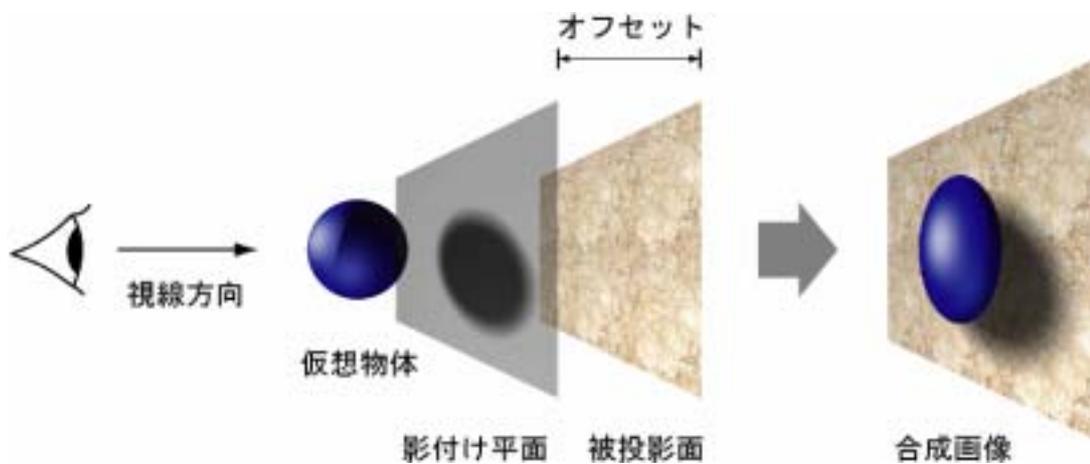


図 14 影付け平面の仕組み

図 14 に示すように、影付けのための平面は被投影面から若干視線方向にオフセットすることによって、オブジェクト同士の干渉を防いでいる。影付け平面には最終的にそのときの光源状況に応じて合成した影をマッピングすることになるが、平面自体は黒いオブジェクトとし、貼り付けた影の画像をアルファ値に設定することにより、後方に位置する対象オブジェクトにあたかも影が落ちたかのように見せかけることができる。

また、次の図 15 は通常影付け処理と影付け平面による擬似的影付け処理の比較を示す。まず対象オブジェクト後方の投影面に影付け平面を配置し、オフラインでの影付け処理によって落とされる影を取得する。次に得られた影画像を影付け平面にマッピングすることにより、オンラインでは影付け処理を行わずに影の表現をできるようになる。

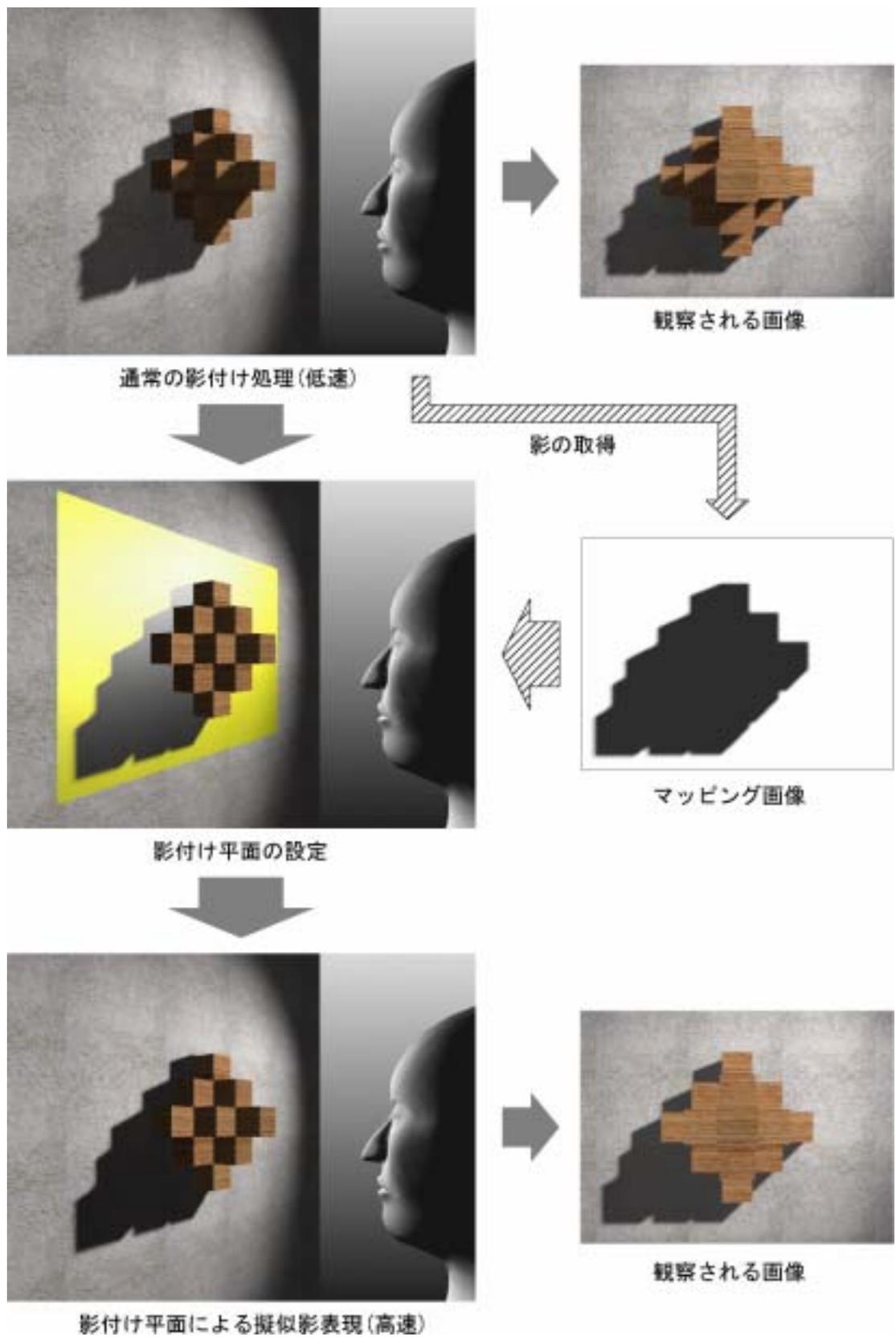


図 15 影付け平面による擬似的影表現

図 16 は影付けの対象となる CG モデルに対して影付け平面の設定を行った例を示す。モデルは川原寺中門部分である。

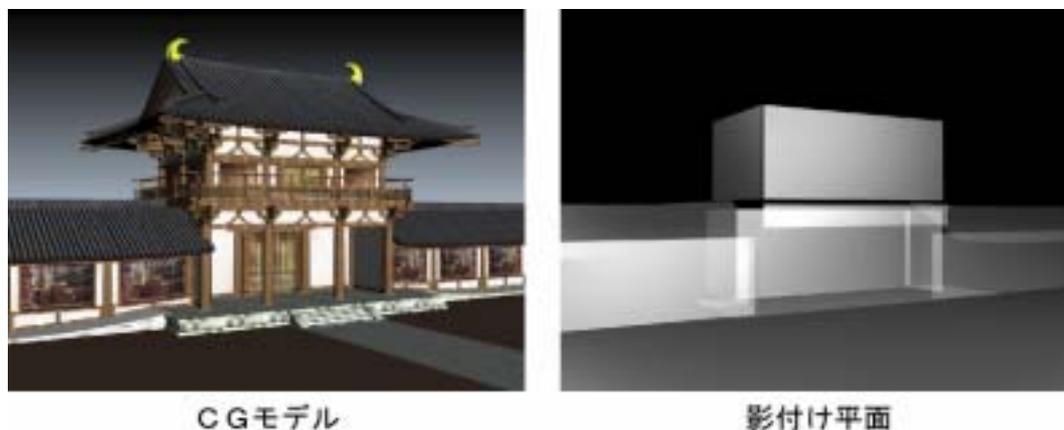


図 16 影付け平面の設置状況

このように建物の各階壁面や屋根部分のまとまりごとに影付け平面を設定することによって、地表面だけでなく、庇や柱から建物自身に落ちるセルフシャドウも表現することができる。

佐藤らの手法[50]では、 $z=0$ の平面に落ちる影のみを表現することができたが、本論文の提案手法では、影付け平面を3次元空間上で自由に配置することにより、対象 CG モデルのすべての面に対して影付けを行うことが可能である。

### 3.3.2 光源の配置

次の図 17 は対象となる CG モデルに対して、実光源環境を近似した平行光源を配置した状態を表す。ここでは光源近似で用いた面数 40 の Geodesic dome を使用する。各平行光源は三角形面の中心に位置し、モデルの中心に向けられている。すなわち CG モデルをそれぞれの平行光源でレンダリングすることにより、多面体各面方向からの照明に対応した影の現れ方を調べることができる。

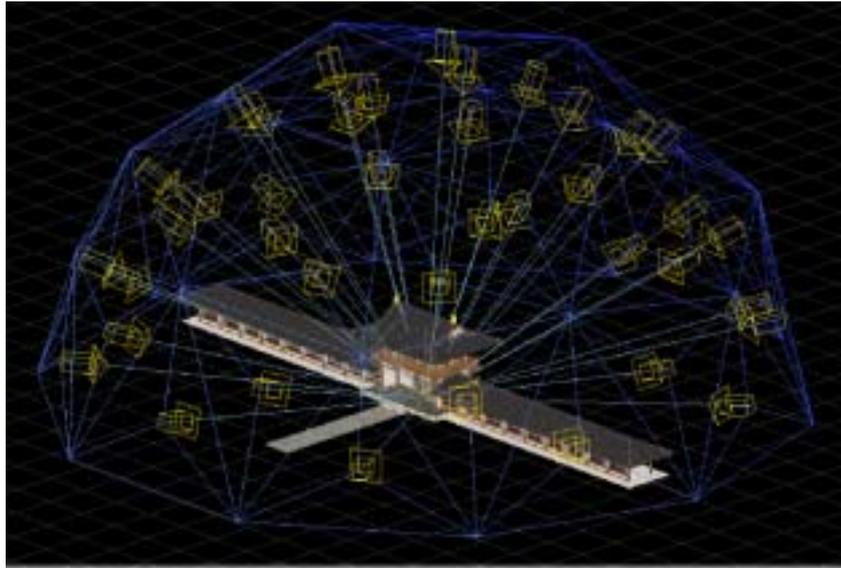


図 17 平行光源の配置

### 3.3.3 基礎画像の生成

次に多面体上に配置した各平行光源を個々に有効にした状態でそれぞれレンダリングを行う。この段階までの処理はすべてオフラインで行われるため、拡張現実システムにおける実時間処理の制約を受けない。すなわちCGにおいて計算コストの高い影付け処理や、間接光や物体間の相互反射の影響を含めた精密なレンダリングを、時間の制約を気にすることなく行うことができる。ラジオシティ法などのレンダリング手法は、非常に写実性の高い画像が得られる代わりに膨大な計算時間を必要とするものであった。しかし本手法を用いることによって、限りなく精度の高い影付け処理の施されたレンダリング画像を使用しながら、なおかつ拡張現実システムに実装可能な処理速度を実現することができるようになる。

仮想物体の影を画像として取得するには、後に合成した影画像をマッピングするために用意した影付け平面を観察すればよい。つまり影付け平面をセットした主要な壁面や屋根面に向けて、カメラを平行投影することにより平面にCGモデルの影が落ちる様子を見ることができる。

次の図 18 は仮想世界の地面に対する基礎画像のレンダリングシーンを示す。カメラは垂直下方向に直行投影しており、建物の影が地面に落ちる様子を取得している。またここで建築物モデル自体はカメラに対して不可視であり、レンダリングに支障をきたす心配はない。

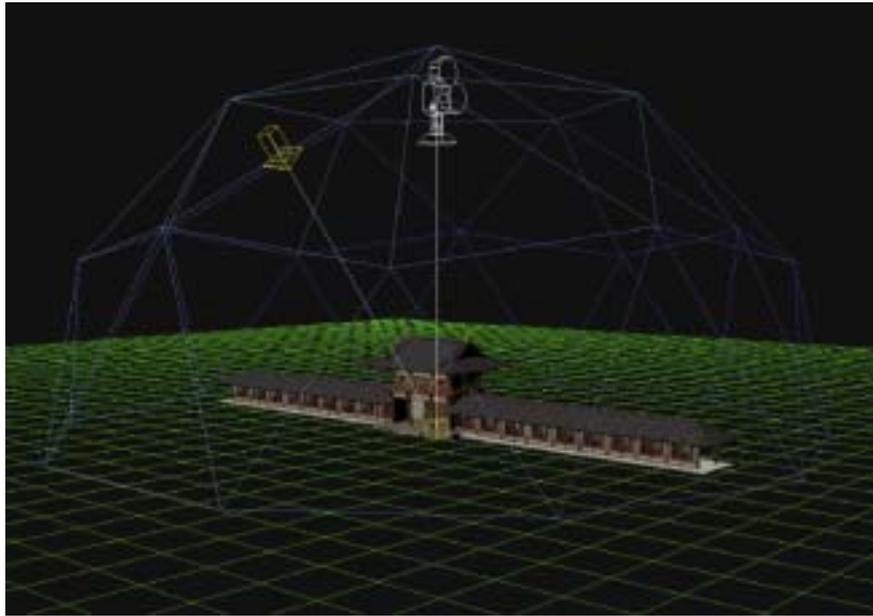


図 18 基礎画像の生成シーン（地面）

建築物の壁面や床面などに配置された影付け平面に対しても、同様に直行投影カメラの配置を行い、基礎画像の取得を行う。本論文の特徴はここで影付け平面を3次元空間上の自由な位置に配置できることである。壁などの視点に対して垂直な面や、屋根のような斜面、また影画像マッピング用のテクスチャ座標が正しく設定できれば矩形以外の形状をもったポリゴンに対しても適用可能である。

図 19 は、仮想物体前面に垂直に配置した影付け画像に対して基礎画像の生成を行うシーンを表している。影付け平面の法線方向へ直行投影カメラを配置することにより、3次元空間上のあらゆる面に落ちる影を観察することができる。

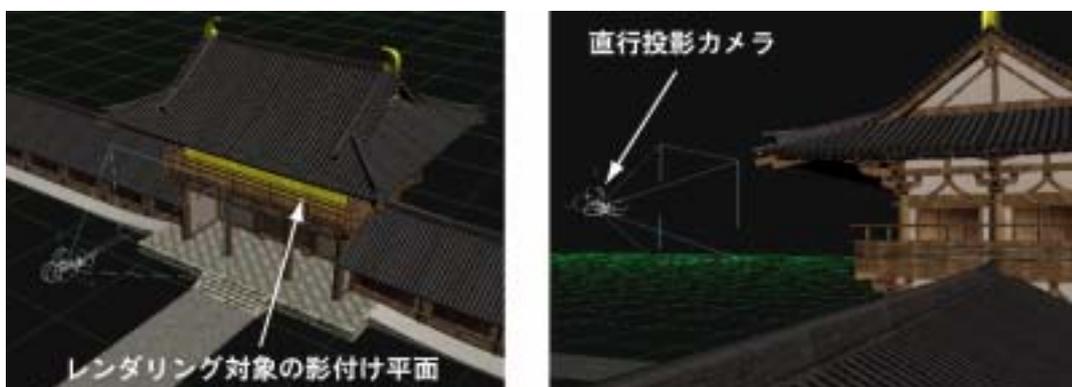


図 19 基礎画像の生成シーン（中門二重南側壁面）

図 20 は地面におちる建物の影を鉛直方向からの平行投影によって取得した基礎画像を表す。40 個の平行光源によって少しずつ影の位置が動く様子がわかる。また影の落ちない部分についても、対象面に入射する角度によって光源輝度の減衰が生じ、照度に差が現れることを確認できる。

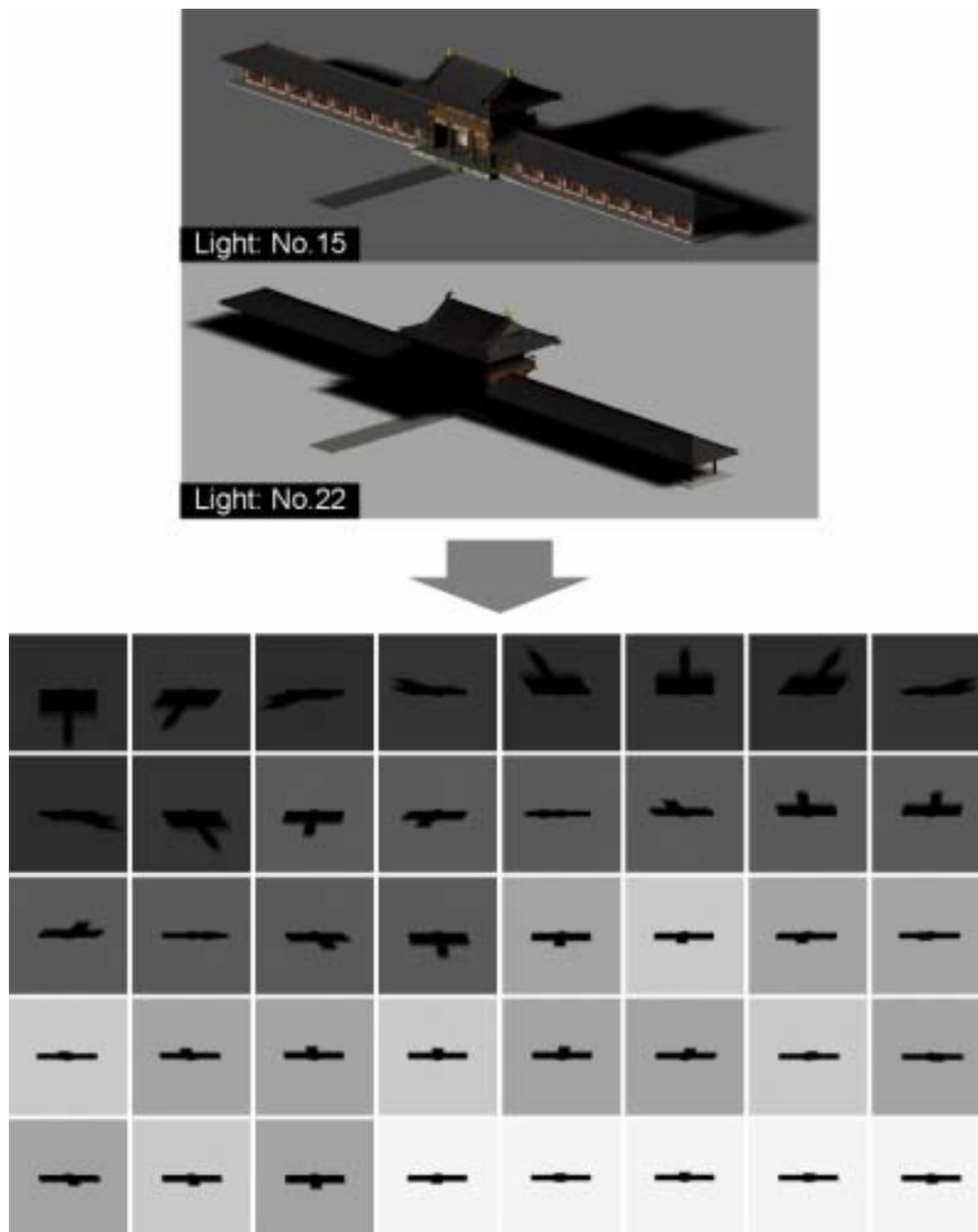


図 20 基礎画像の例(地表面)

以上のようにして、各影付け平面ごとに、多面体の面数分の基礎画像を取得することができる。すなわち  $n$  個の平行光源 ( $L_j; j=1,2,\dots,n$ ) と、 $m$  枚の影付け平面を用いることによって、 $m \times n$  枚の基礎画像 ( $Ib_{j,i}; j=1,2,\dots,m, i=1,2,\dots,n$ ) を生成することになる。

### 3.4 オンライン処理

本節では提案手法におけるオンライン処理について説明する。オンライン処理の部分とは、拡張現実システムにおける実時間の描画ループ中の処理を示し、オフライン処理で生成した基礎画像を用いて実光源環境に応じた陰影付けを行い、最終的に実画像と CG 画像の合成を行うまでの過程を意味する。

まずプログラムの起動からメイン描画ループを一巡するまでのおおまかな処理の流れを示すと以下ようになる。

1. 起動，システム初期化，仮想世界シーンの初期化
2. CG モデルおよび基礎画像等の読み込み
3. 実光源環境の計測，実画像の撮影
4. 全方位画像の分析，輝度パラメータの決定
5. 輝度パラメータの集約，シーン光源の強度決定
6. 基礎画像の線形和計算，影画像の合成
7. 影画像を影付け平面にマッピング
8. 実画像のシーンへの描画
9. シーンのレンダリング，合成処理
10. HMD 画面への描画

次の図 21 は毎フレームごとの描画処理の流れを表す。

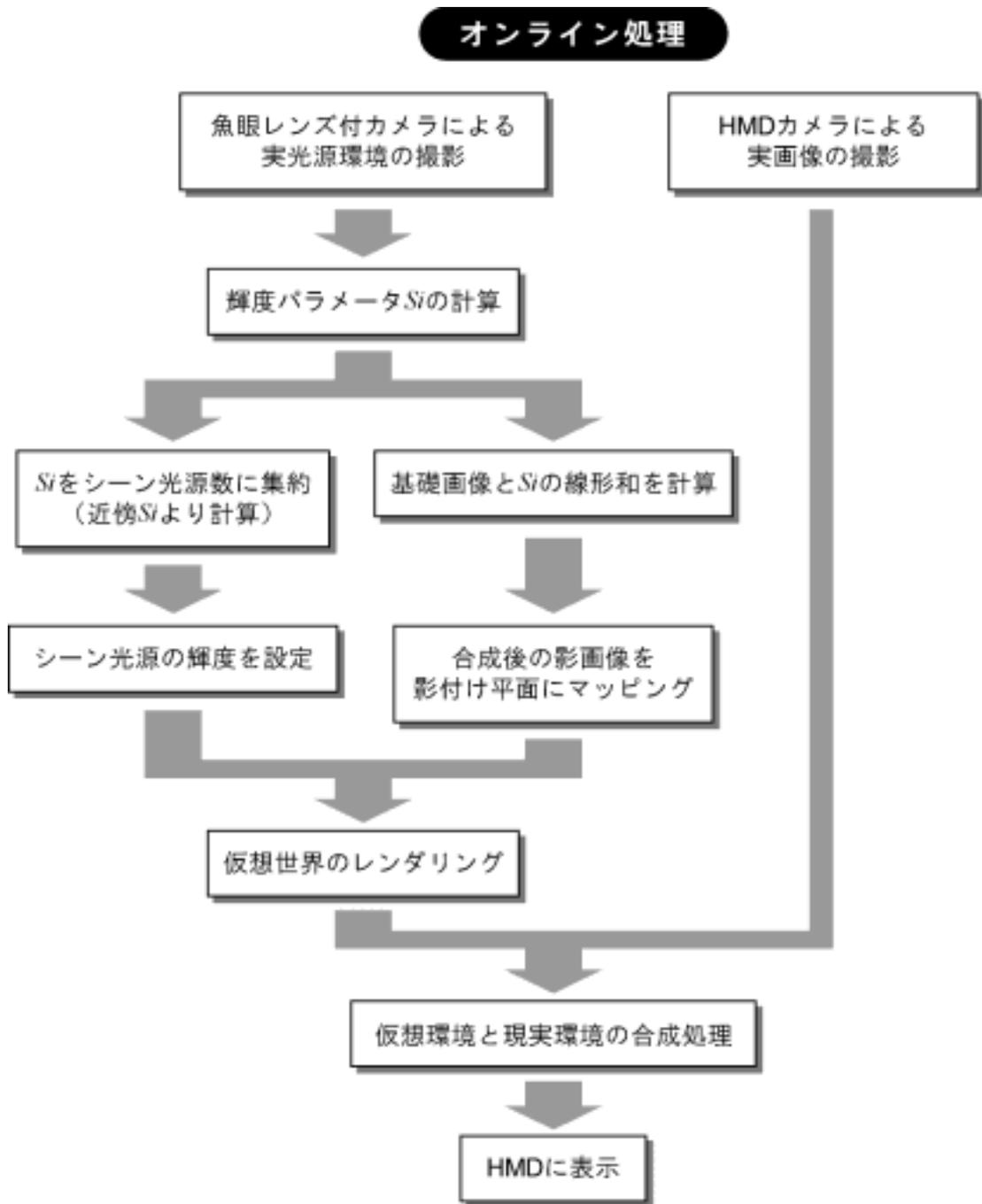


図 21 オンラインでの処理の流れ

### 3.4.1 輝度パラメータの計算

まずに、魚眼レンズ付きビデオカメラを用いて撮像される全方位画像により、実世界の光源環境を計測する。次の図 22 は装置の外観と、様々な屋外環境における全方位画像の例を示す。



図 22 魚眼レンズ付きビデオカメラ



図 23 屋外環境における全方位画像の例

カメラは地平面に対して鉛直上方向を向くように配置する。そのため魚眼レンズによって得られる全方位画像の撮影範囲は、空や周囲の建物・木立を含む半球状の領域になる。ここで前述の光源近似方法を適用することにより、実光源環境を撮影した全方位画像の分析から、半球状面光源を近似した各平行光源の輝度の分布を取得することができる。

全方位画像に表示されている白線は、光源配置に使用した多面体を投影したものである。すなわち各々の三角形領域が多面体の各面に相当し、これらの三角形領域内の画素の明るさを計測することにより、その面によって近似される光源部分の輝度を推測することができる。

ここで光源環境を近似した多面体各面ごとの輝度を表現するために、輝度パラメータ  $S_i (i=1,2,\dots,n)$  を導入する。  $S_i$  は各面に設置した平行光源の強度を意味し、仮想世界のシーン内における光源の強度に反映されるとともに、基礎画像からソフトシャドウを合成する際に各基礎画像に乘算されるスケールを表す。取得した全方位画像に対して多面体を投影して各面ごとの領域に分割する。そして各々の領域ごとの画素の明るさの総和を求め、その領域での明るさの最大値で割ることによって、各面ごとの輝度パラメータ  $S_i$  を取得することができる。

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} I_j}{I_i \max} \quad (3.4)$$

式(4)において、  $n_i$  は各領域の画素数、  $I_{Max_i}$  は各領域の明るさの最大値を表す。全方位画像の各三角形領域の輝度を計測するにあたっては、各々の領域を示したインデックス画像を用いる。インデックス画像の同一輝度領域に該当する画素の明るさを合計し、輝度パラメータ  $S_i$  を取得する。

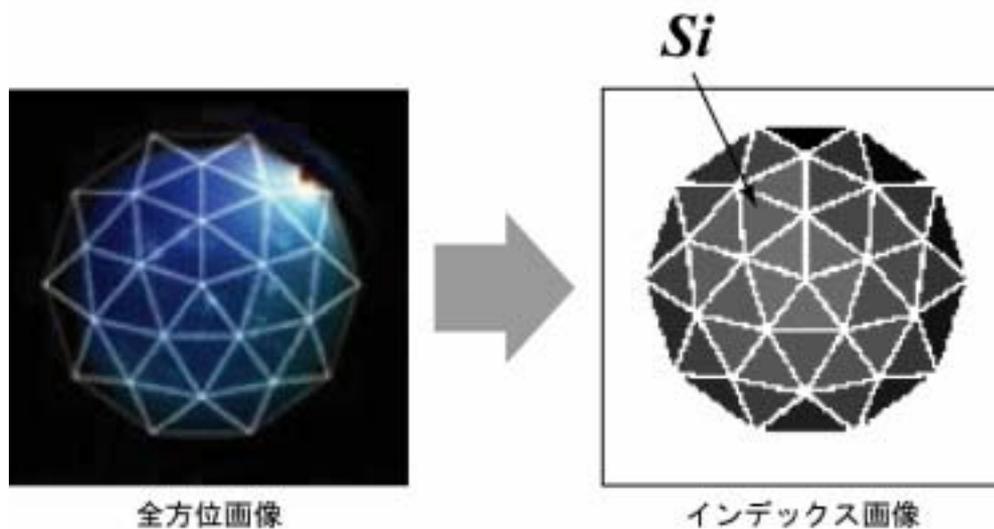


図 24 インデックス画像による全方位画像の分析

### 3.4.2 シーン内光源の設定

次に、前節で求めた輝度パラメータ  $S_i$  から、仮想世界のシーン内における光源の強度を設定する。本来ならば基礎画像の生成に用いた平行光源のすべてを使用すべきところであるが、本論文の実装環境では配置できる光源数に制限があり、またあまりに多数の光源は描画時間を著しく低下させるデメリットがあるために、ここでは40の光源をバランスよく代表するような6つの平行光源  $L_k$  ( $k = 1, 2, \dots, 6$ ) を選定した。

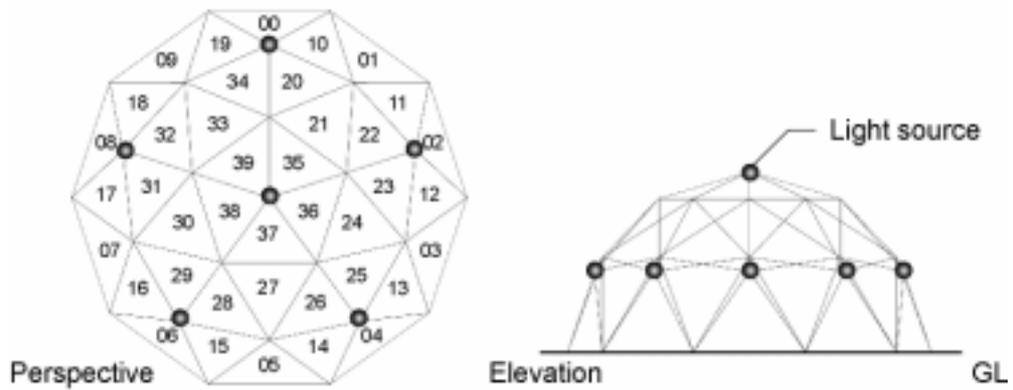
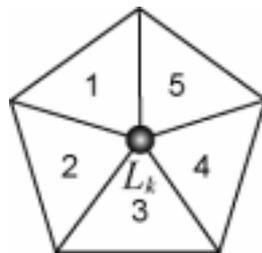


図 25 シーン内の光源

これらの平行光源に対しては、近傍の三角形領域における  $S_i$  の総和を求めることによって強度を決定している。



$$L_k = \frac{\sum_{i=1}^5 S_i}{L_k \max} \quad (3.5)$$

仮想世界のシーン内に配置されたこれらの光源は、仮想物体表面のシェーディングに反映される。現実世界の光源環境をもとに計算した輝度パラメータから光源強度を求めることにより、直接光・間接光の影響を考慮した適切な陰影付けを行うことができる。

### 3.4.3 基礎画像の線形和

光源輝度と物体表面の明るさの関係の線形性を利用することにより、あらかじめレンダリングしておいた基礎画像と輝度パラメータ  $S_i$  から、実光源環境に対応した影画像を合成することができる。ここで、基礎画像  $Ib_i$  における明るさの最大値  $a_i$  に対しても同様に線形和を求めておく。 $a_i$  は基礎画像における影のまったくかからない部分の明るさを表し、基礎画像を生成した段階で計測できるため、オフラインであらかじめ取得しておく。

次の図 26 は基礎画像と輝度パラメータの線形和によって合成された影画像を表す。多数の基礎画像を重ね合わせることによって、やわらかい輪郭をもったソフトシャドウが生成されることがわかる。

$$S_1 \times Ib_1 + S_2 \times Ib_2 + \dots + S_n \times Ib_n = I_{sum}$$

$$S_1 \times a_1 + S_2 \times a_2 + \dots + S_n \times a_n = A_{sum}$$

図 26 基礎画像と輝度パラメータによる線形和

合成画像  $I_{sum}$  と、基礎画像における明るさ最大値の合計スカラー値  $A_{sum}$  は、各影付け平面ごとに求められる。よって、 $i$  枚の基礎画像と輝度パラメータ、 $j$  枚の影付け平面が存在する場合には、 $I_{sum}$  および  $A_{sum}$  は次のように計算される。

$$Isum_j = \sum_{i=1}^n S_i \times Ib_{j,i} \quad (3.6)$$

$$Asum_j = \sum_{i=1}^n S_i \times a_{j,i} \quad (3.7)$$

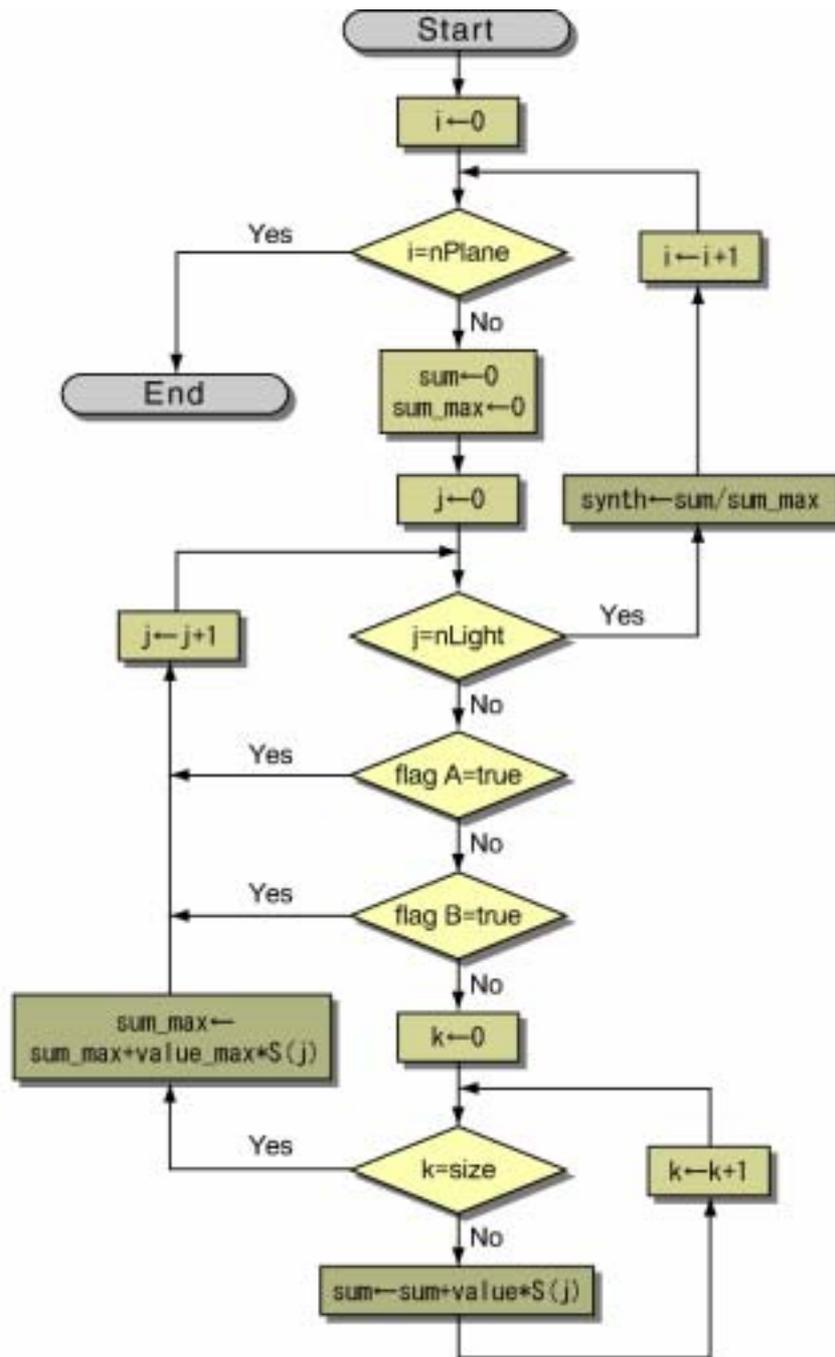
ここで  $Isum$  と  $Asum$  の比  $T(0 \sim 1)$  は、仮想物体の影の濃度スケールを意味する。

$$T_j = \frac{Isum_j}{Asum_j} \quad (3.8)$$

すなわち、 $Isum$  の画像中において  $T = 0$  となる画素はいかなる光源の影響も受けない照度 0 の領域を示し、反対に  $T = 1$  となる画素はまったく影の影響を受けず、光源の入射角による減衰のみを表す領域を意味する。

以上のようにして、基礎画像からの線形和計算によって求めた影画像を基礎画像中の明るさ最大値の合計で割ることにより、影の濃度スケールを表す画像が得られる。

次の図 27 は基礎画像線形和ループにおける処理の流れを示している。



$S(j)$ :  $j$ 番目光源の輝度パラメータ

$i$ : ループ制御変数 (平面数)

$j$ : ループ制御変数 (光源数)

$k$ : ループ制御変数 (画素数)

$nPlane$ : 影付け平面総数 (14)

$nLight$ : 近似光源総数 (40)

flag A: 基礎画像有効フラグ

flag B: 輝度パラメータ閾値フラグ

sum: 画素の明るさ合計

sum\_max: 基礎画像の明るさ最大値の合計

value: 画素の明るさ

value\_max: 画像中の明るさ最大値

synth: 合成後の影画像

図 27 基礎画像合成のフローチャート

### 3.4.4 影付け平面へのマッピング

次に、この画像をそれぞれの影付け平面へアルファ画像としてテクスチャマッピングすることにより、シーン内における仮想物体の影を表現することができる。

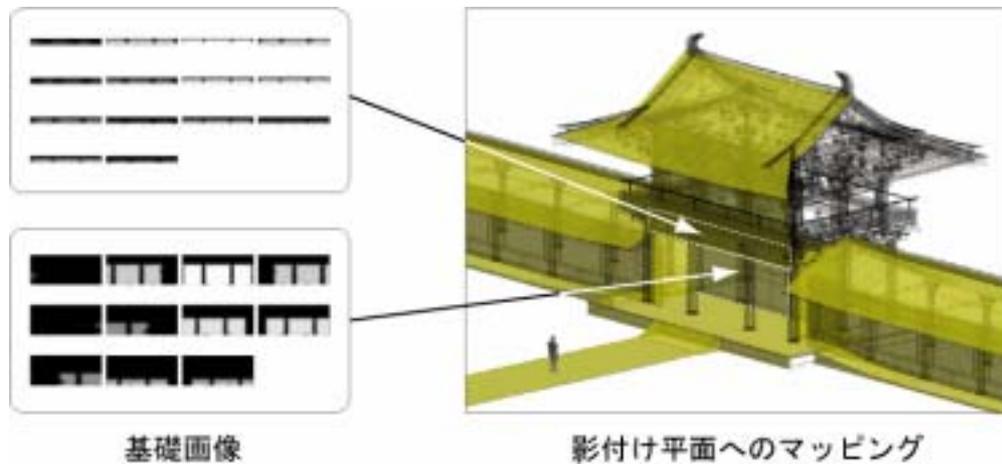


図 28 影付け平面へのマッピング

3.3.1 節で述べたように、影付け平面は黒いオブジェクトとして設定されているため、濃度スケール $T=0$ となる部分は完全に暗黒の点となるが、反対に $T=1$ となる部分はまったく影のかからない点として、透明に処理される。

### 3.4.5 仮想物体の実画像への重ねこみ

最後に、仮想物体の実画像への合成処理を行う。本研究ではビデオシースルー型のHMDを使用するため、実画像の取得はHMD前面に取り付けられたビデオカメラによって行われる。ここでは取得した実画像を次の3つの部分に分けて考える。

- 仮想物体の表面を見込む領域
- 実画像に対して仮想物体の影が落ちる領域
- 実画像において仮想物体の影の影響を受けない領域

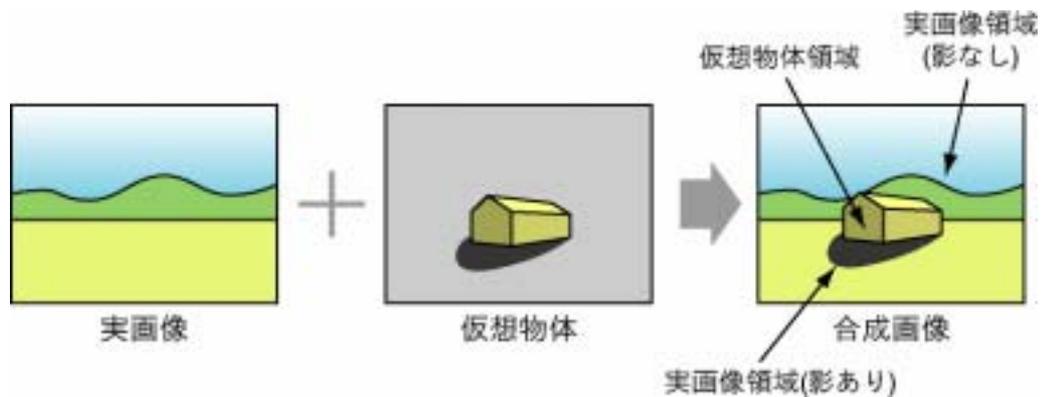


図 29 合成領域の分類

まず1の領域に関しては、仮想物体表面と観察者の間に影付け平面が存在するため、この平面にマッピングされた影画像の濃淡によって、仮想物体自身に適切に影が落ちる状態を表現することができる。すなわち仮想的な壁や床面に、同じく仮想の柱や庇によってつくられた影が投影される様子を見ることが可能となる。

次に2の領域に類するものとしては、例えば実世界の地表面において仮想物体の影が落ちる部分などが該当する。この場合は、実画像に影付けを行うための平面を用意しておくことにより、1と同様に処理を行うことが可能である。つまり拡張現実システムにおいて、地表面は仮想物体ではなく実画像をそのまま利用する場合でも、仮想の地表面に相当する影付け平面を設置することにより、実画像に対して影の濃淡を重ね合わせることができる。入力画像上での実物体表面において観察される色を  $P$  とする場合、仮想物体の影の影響を受けて観察されるべき色  $P'$  は、基礎画像の合成結果と明るさ最大値の比を用いて次のように表される。

$$P' = P \frac{I_{sum}}{A_{sum}} \quad (3.9)$$

最後に3の領域に関しては、仮想物体を表示する必要もなく、またその影の影響も蒙らないため、入力された実画像の画素をそのまま描画することになる。

以上の手順を経て、オンライン処理における実光源環境の計測から基礎画像の合成、影画像の影付け平面へのマッピングと実画像との合成処理を行い、1フレームの描画処理が完了する。その後、再び実世界の光源環境を撮影し、ユーザの位置・姿勢を

計測することによりシーンを更新し，描画ループを繰り返し処理する．

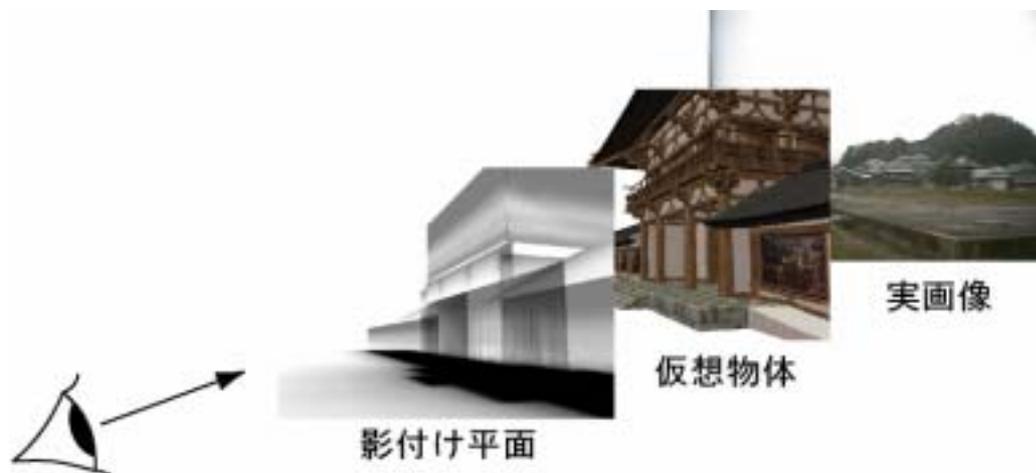


図 30 合成処理の概念図

提案手法を用いて現実世界の光源環境に対応した適切なシェーディング・影付けを行うことができる．本論文では基礎画像の生成までをオフラインで処理することにより，間接光や物体間の相互反射を考慮したラジオシティ法などの精密なレンダリング手法を用いながら，高速度で影付け処理を行うことが可能となる．全方位画像の分析および，基礎画像の線形和を求める計算については，実時間での処理が十分可能であり，拡張現実システムに適用することができる．

## 第4章 実験対象

明日香川 瀬々の玉藻の うちなびく  
心は妹に 寄りにけるかも

『万葉集 卷 13-3267』

## 第4章 実験対象

本章では，本論文の実験対象である川原寺と，復元 CG モデルの作成過程について説明する．まず，拡張現実システムを用いて川原寺を仮想的に復元するバーチャル川原寺プロジェクトについて紹介し，川原寺の位置する奈良県明日香村の概要を説明するとともに，当地と関連の深い飛鳥時代の歴史について概観する．次に川原寺の創立から現在に至るまでの歴史と伽藍の構成および状態について述べる．最後に川原寺の復元 CG モデルを制作過程について，順を追って解説する．

### 4.1 バーチャル川原寺プロジェクト

バーチャル川原寺プロジェクトとは，奈良県明日香村に位置する史跡，川原寺跡を対象に，CG による文化財建築の復元と拡張現実感による現地での展示を試みるものである．ここではプロジェクトの概要を紹介し，対象となる明日香村および川原寺の背景について説明する．

本プロジェクトは川原寺を CG で仮想的に復元し，現地屋外での拡張現実システムを用いた展示を目的とするものである．対象地域の奈良県明日香村は，飛鳥時代(6世紀末～8世紀初め)に朝廷が置かれたといわれ，当地に存在した木造建築は残念ながらそのほとんどが風化，焼失の憂き目にあっている．川原寺もその一つで，木造の建物部分は失われ現在はわずかに基壇と礎石の一部を残すのみとなっている．



図 31 拡張現実感による復元展示

拡張現実感による屋外での大規模なアプリケーションは、デバイスの小型化や計算機の処理能力の向上により徐々に現実的になりつつある。遺跡現地での復元モデル表示は、コンピュータ科学と考古学・歴史学の両分野にとって興味深い研究領域であると考えられる。そのほかにも本研究は一般の観光客にアピールできる魅力を備えており、プロジェクトによって期待される効果は以下の3点にまとめられる。

1. わかりやすい展示により，体験者の学習効果を促進
2. 迫力ある映像により，エンターテインメント性を演出
3. 大掛かりな展示施設を必要としない，環境にやさしい野外博物館

明日香村に多く存在する遺跡については、これまで博物館や資料館において復元模型や図面を見ることができた。しかし実際の敷地に赴いてみると、建物基礎部分の痕跡だけがわずかに残っているだけで、在りし日の姿を思い描くことは鑑賞者の想像力にまかされる。しかし一般の観光客にとっては往時の姿を明確にイメージすることは困難であり、史跡の魅力が伝わりにくくなっていると考えられる。

そこで拡張現実感による復元CGモデルの表示を現地で行えば、離れた場所にある模型や図面から想像する必要なしに、その場で復元案を確認することができる。また実寸大で正確な位置に現れるCGモデルは、遺跡の構造をわかりやすく示し、体験者の学習効果促進することが期待できる。

CGによる復元画像は実スケールで体験者の目前に出現するため、縮小サイズの復元模型や複製を見る場合よりも、臨場感のあるスリリングな体験が得られると考えられる。CGは上述のように、本来ゲームやエンターテインメントへの応用が盛んな技術である。本プロジェクトにおいても、当時の人々でにぎわう往来を再現したり、歴史上の人物によるナビゲーションを導入するなどの演出効果を加えることによって、既存の遺跡観光地とは一線を画する斬新なエンターテインメント性を付与することが期待できる。

最後に、拡張現実システムは従来の博物館での展示や複製制作を代替できるため、大掛かりな施設の建造を必要とせず、自然環境への負荷も少ないと考えられる。対象となる地域の周辺には、国営飛鳥歴史公園[51]に指定された地区が存在し、豊かな自然と歴史的風土の保存と活用が図られている。そのため復元展示における環境への影響はなるべく抑えることが本プロジェクトの前提条件である。

さらに特殊な条件として考慮すべき点は、対象地域の明日香村全域に対して制定されている、古都保存法特例法「明日香法(正式名称：明日香村における歴史的風土の保存及び生活環境の整備等に関する特別措置法)」[52]である。古都保存法とは「古都における歴史的風土の保存に関する特別措置法」の略称であり、高度経済成長期の過剰な開発に歯止めをかけるため、昭和41年(1966年)1月に公布、施工されている。現在この法律が適用されている市町村は全国に7市1町1村存在し、京都市、奈良市、鎌倉市、天理市、橿原市、桜井市、斑鳩町、明日香村がそれに該当する。古都保存法の適用地域では、歴史的遺産と風土、環境を保全するため、建築や造成などに一定の制限が課され、許可を得られない場合には損失の補償金や土地の買入れなどが行われるように定められている。明日香法は昭和55年(1980年)5月に古都保存法の特例法として制定されている。

このように当地の歴史的風土は法令によって保護され、無分別な開発行為は固く禁じられているため、比較的小規模の設備で構成される拡張現実感による展示は、この点でも有利であると考えられる。

以上の観点から、バーチャル川原寺プロジェクトは明日香村の豊かな自然の中でのびのびと体験できる、屋外型の複合現実展示の開発を目指している。川原寺の創建当時の姿をCGで映し出し、過去と現在が入り混じり、古代飛鳥へ時空を超えてタイムスリップするような、魅力的な体験を提供する。新しい展示により、村そのものの魅力を発展させ、当地を訪れた人々へ地域の歴史的風土と文化財への深い理解を

育むことが期待できる。また最新技術の適用による話題性の創出は、新しいテクノロジーに敏感で好奇心旺盛な若年層に明日香の魅力を強くアピールできると考えられる。バーチャル川原寺プロジェクトは、人々が集い触れ合う場として時代が変わっても受け継がれる日本人の心のふるさと飛鳥を再認識させるとともに、歴史の神秘・雄大な自然との感動的な出会いを提供する。



図 32 バーチャル川原寺プロジェクトのコンセプト



川原寺跡の上に…



復元コンピュータグラフィックスが出現

図 33 展示イメージ図

## 4.2 明日香村について

明日香村は昭和 31 年 7 月 3 日、旧高市郡阪合村、高市村、飛鳥村の 3 村が合併して誕生した村である。明日香という名称は、合併時に万葉集の「飛鳥 明日香能里 乎 置而伊奈婆 君之当者 不所見香聞安良武」にちなんで名づけられている。

本村は、わが国の本格的な国家体制の始まりともいえる律令国家が形成された時代における政治・文化の中心地であり、村内全域にわたって多くの遺跡や歴史的文化的遺産が保存され、ほかに類を見ない貴重な歴史的風土を形成している。本節では実験の対象となる川原寺が位置する明日香村の現状を説明するとともに、本村に関連の深い飛鳥時代の概要について政治・文化の側面から考察を試みる。

### 4.2.1 地理・風土



図 34 明日香村の位置

明日香村の総面積は約 24 平方 $\text{km}^2$ で、地理的には奈良盆地南部に位置し、奈良市から約 25  $\text{km}$ 、大阪市から約 40  $\text{km}$ の圏域にある。また地形的には奈良盆地南端の平地と、盆地と吉野川溪谷との間に東西に連なる竜門山地の一部とからなっている。

本村北半は奈良盆地南部の大和三山南方からはじまり、大和川支流の飛鳥川流域および曾我川支流の高取川流域から構成される沖積平野となっている。飛鳥川の堆積によって生じたこの平野は本村の中心部をなし、低い丘陵に囲まれた盆地状となっている。盆地の形状は南北約 4  $\text{km}$ 、東西 1~0.5  $\text{km}$ で南端から北端にかけて出海抜 120

から75と緩やかに傾斜している。

一方本村東南部は村全体の約2/3にあたり、竜門山地の南部北斜面に占められている。この山地は西南日本を東西に走る中央構造線の断層作用によって生じたもので、本村の領域では竜在峠雲居茶屋付近の海拔753.5を最高点とし、飛鳥川上流の稲淵川・冬野川の浸食により深い溪谷を形成している。

このように明日香村は奈良盆地南部のシンボルとして鼎立する畝傍山・耳成山・香具山の大和三山と竜門山地から延びる低い丘陵に囲まれた平野に位置し、趣の多い景観に囲まれている。本村を貫いて北西に流れる飛鳥川は大和三山とともに万葉集に多く歌われ、古くから人々に親しまれていた様子うかがえる。

図35は国営飛鳥歴史公園の甘樫丘地区豊浦展望台・祝戸地区東展望台よりそれぞれ明日香村および大和三山・橿原市方向を望んだものである。美しい山々と丘陵に囲われた明日香村の田園風景を眺めることができる。



図 35 甘樫丘からの眺め



図 36 祝戸地区から北方向を望む

明日香村の気候については、年平均気温 14.4 度、年降水量 1,449 ミリであり、気温と降水量の点からは奈良盆地・吉野川渓谷の中間にあたることを示している。奈良盆地は温暖寡雨で瀬戸内型気候に類似するが、海洋から遠いため寒暑の差が大きく、内陸性気候の特色を示している。一方太平洋に面する紀伊半島地方は、海洋の影響を受けて温暖多雨の気候を示し、明日香村は奈良盆地から紀伊半島への遷移地帯にあたることから、盆地中心の八木に比べるとやや低温多雨となっている。吉野山地は降水量が年間 2,000～4,000 ミリと非常に多く、大台ヶ原山はわが国の最多雨地域にあたる。しかし明日香村は盆地の影響により降水量は奈良県下で最も少ない地域に属しているため、水田灌漑用に溜池が多数造られ、また吉野川の水を分水するなど、水源を確保するための工夫が行われている。風速は「采女の袖吹き返す」の古歌に偲ばれるように非常に弱くおだやかである。

明日香村の世帯数と人口は平成 12 年の国勢調査の結果によれば、1,837 世帯、6,846 人である。そのうち生産年齢人口比は 63.3%、年少人口比は 12.8%、高齢人口比は 23.9%となっている。大正 9 年（1920）から 5 年ごとに行われている国勢調査をもとに人口の変遷をみると、第一回調査から戦前までは総人口は 6 千人代で推移してい

たが、戦争直後の昭和 22 年（1947）に激増して 8 千人を超えている。それ以後は減少傾向にあったが昭和 50 年代から微増し、平成 7 年（1995）から再び減少に転じて現在にいたっている。わが国では現在一般に農山村は過疎現象を呈する状況がみられるが、明日香村に関しては最近 20 年間で減少率はわずか 2%程度にとどまり、さほど著しい人口減少は進んでいないと考えられる。

明日香村の土地利用区分に関しては昭和 45 年（1970）4 月現在において、総面積 24.04 平方<sup>キ</sup>に対して耕作地 6.714 平方<sup>キ</sup>（27.9%）、山林 6.97 平方<sup>キ</sup>（29.0%）、宅地 0.71 平方<sup>キ</sup>（2.9%）、道路河川その他 9.65 平方<sup>キ</sup>（40.2%）となっている。村の約 30%が耕地として農業の基盤となり、50%が山地として林業の基盤になっている。明日香村の農産物は京阪神の大消費地に近いことから近郊園芸地帯として発展し、特にみかんを主とする果樹・いちご・きゅうり・トマト・しょうが等の野菜が生産されている。

明日香村は飛鳥時代の政治・文化の中心地であり、神社仏閣をはじめとして名所旧跡が集まり、美しい自然と古い文化財が融合したすばらしい景観は「心のふるさと」として多くの人々を当地に引きつけている。当村は現在でも全国屈指の観光地として名を馳せているが、観光地としての歴史はるか昔にさかのぼる。平安時代、観光の起源として「伊勢参り」「吉野詣」などの物詣が始まったが、この頃より飛鳥の岡寺・橘寺・飛鳥大仏を対象とした「飛鳥巡り」も行われるようになっていく。特に天下泰平の江戸時代には盛んになり、中でも岡寺は西国三十三番の七番の札所として巡礼が行われた。またこの頃、貝原益軒・松尾芭蕉・本居宣長・頼山陽等の文人墨客も当地を訪れている。その後、明治 23 年に大阪・奈良間を鉄道が開通、畝傍・桜井へも通じたことから交通が便利になり、信仰物詣から近代的遊覧地へと発展した。昭和 42 年（1967）より村内に民宿が開設、観光バスや自家用車による来村に備えて村営駐車場が設営されるとともに、飛鳥駅には観光用自転車が常備されることとなった。現在本村を訪れる観光客は、物詣の信仰を主とするものや、古都の史跡見学、修学旅行など様々である。（以上は参考文献[53]による）

#### 4.2.2 文化財

明日香村には古墳・石造物・寺院跡・宮殿跡などの遺跡が数多く残されており、現在も村内の各所で発掘調査が継続されている。文化財保護法に基づき国が指定する

本村の文化財を付録に挙げる[付録A]. 本節ではこのうち主要な古墳と寺院4点について解説する.

- **石舞台古墳**



図 37 石舞台古墳

石舞台古墳は、細川谷に入っていく溪口部の大地上に築成された大方墳で、飛鳥所在古墳の代名詞になる著名な古墳である。この古墳は、古くから石室天井部の石が露出していて、『西国三十三所名勝図会』などに旧態が描き出されており、『和州旧跡考』には「その近き所に石太屋とて陵あり」との記事がみられ、石舞台の呼称といずれが先後するのかわからないが、転訛すれば共通の語となる。古墳は横穴式石室の構造をとり、その規模は玄室の長さ7.57メートル、幅3.47メートル、高さ7.73メートル、奥壁は二段積み、両側壁は三段に積まれ、天井は二石の巨岩で覆われている。最大の石は南側の天井石で約77トンと推定されている。

- **高松塚古墳**



図 38 高松塚古墳

中尾山古墳と文武天皇陵との中間の丘陵南西斜面に立地している。墳丘は直径 18 メートル、高さ 5 メートル程度の円墳であり、江戸時代には文武天皇陵に考えられていたこともある。内部は横口式石槨で、内法長さ 2.055 メートル、幅 1.035 メートル、高さ 1.134 メートルとなり、底石は三石、東・西側壁石は共に三石、北奥壁石は一石、天井石は四石の凝灰岩切石をもって築造されている。石槨内には漆喰が全面に塗られ、極彩色の壁画が描かれていたが、画題は日月星宿と四神、男女人物像群であった。現在は高松塚古墳壁画館にて古墳内部の原寸復元と壁画の模写を見ることができる。

### ● キトラ古墳



図 39 キトラ古墳

二段築成の円墳で規模は、上段が直径 9.4 メートル、テラス状下段が直径約 14 メートルで、高さ約 3.3 メートルである。奥北壁は 1 枚、側壁の東西は各 3 枚、天井は 4 枚の石材で構成されている。石槨の石材は、切石の表面に黒っぽい斑点が見られることから、凝灰岩であると考えられており、石の表面は漆喰で薄く平らに塗られている。昭和 55 年（1986）に行われたファイバースコープによる探査で墳丘内の石槨奥壁に玄武の壁画が確認されている。また平成 10 年（1998）に行われた調査では新たに白虎、青龍、星宿の極彩色壁画が確認され、さらに平成 13 年（2001）の調査で朱雀像も発見されている。

- **飛鳥寺跡**



図 40 飛鳥寺跡

飛鳥寺は飛鳥時代、飛鳥地方における最大の寺院であり、法興寺、元興寺とも称されていた。元興寺の創建に関する文献資料によれば大化以前、この飛鳥の地に本格的な寺院の建立が行われたのはこの飛鳥寺の建立をもって最初とみることができる。昭和 31・32 両年度にわたって発掘調査が行われ、その結果わかったのは主要伽藍の配置は南門、中門、塔、金堂、講堂と一列に並ぶこと、南門の南側から金堂までに敷石の参道があること、金堂前に大理石の灯籠台が遺在したこと、塔の東西には金堂状の建物があること、そして廻廊は中門から金堂・講堂間にかけて矩形状にめぐることなどである。

### 4.3 飛鳥時代の概要

飛鳥時代とは日本史の時代呼称のひとつで、一般には 592 年の推古天皇の即位から 710 年の平城京遷都までの 100 余年を指す。またその始まりを 6 世紀中頃としたり、美術史などでは大化の改新のはじまった 645 年や天智朝以降を白鳳時代と区別する考えもある。飛鳥時代には政治的には氏姓国家・部民制社会から律令制による中央集権国家の確立までの過渡期にあたり、大化の改新がその流れを決定的にしたといえる。仏教を基調とした天皇中心の統一国家を樹立するという聖徳太子の描いた政治理念は、大化の改新によって受け継がれ、天武・持統天皇によって確立されたと考えられる。しかしながら、いまだ飛鳥の歴史の細部は混沌の中にあり、現状ではまだ今後の研究を待たねばならないことが多い。本節では明日香村に関連の深い飛

鳥時代の歴史について、政治・文化の観点から概観する。なお飛鳥時代の略年表を付録Bに記す。

### 4.3.1 飛鳥時代の政治

588年、蕃神すなわち外国の神とよばれた仏教を積極的に推した蘇我稲目の子である馬子は、物部氏との戦いに勝利し、東アジア世界がこぞって親交を深めていたこの宗教を正式に導入するために、飛鳥寺の建設に踏み切った。翌589年に隋が中国を統一。その4年後の592年に最初の女帝である推古天皇が豊浦宮に即位する。その後、聖徳太子（厩戸皇子）と蘇我馬子の主導で冠位十二階や十七条の憲法が制定される。607年、小野妹子らを隋に遣わして、中国皇帝に「日出る処の天子、書を日没する処の天子に致す。恙無きや。云々。」の国書を送る。留学生・留学僧を隋に派遣し、国家の政治・文化の向上に努める。

物部氏を滅ぼした頃から約半世紀間は蘇我氏が権力を掌握する。聖徳太子と推古天皇の没した後は、蘇我蝦夷とその子、入鹿の専横が目立つようになり、聖徳太子の子、大背兄皇子も蘇我氏によって滅ぼされる。615年、唐が東アジアの盟主として君臨すると、百済・新羅・高句麗の半島の三国はその軍事的脅威に晒され、東アジア情勢は緊迫の一途をたどる。その影響はわが国にもおよび、唐に対抗しうる中央集権国家体制の整備が急がれる中、蘇我氏と天皇家の対立が表面化する。そして645年、大化の改新により中大兄皇子・中臣鎌足らは蘇我氏から政権を奪取し、翌646年、公地公民・班田収授制・集権的行政制度・新統一税制などを掲げて大化の改新の詔を發布する。

663年、唐と新羅の連合軍との戦いによって滅亡の危機に瀕した百済を救援するため3万2000人余りの兵を朝鮮半島に送ったが白村江の戦いにて唐・新羅連合軍に大敗を喫する。隣国の百済、高句麗が相次いで唐に滅ぼされ、その領有をめぐる新羅と唐の間に戦いが起こるなど、緊迫した外国情勢の中で、強力な国家体制の整備が急がれるなか、筑紫に大宰府を守る水城を作り、対馬・壱岐・筑紫に防人や烽が置かれる。

672年、大海人皇子（天武天皇）と大友皇子（弘文天皇）が皇位継承をめぐる内乱（壬申の乱）が勃発し、争いは約1ヶ月におよぶ。吉野宮に隠れていた大海人皇子は天皇崩御の後、伊賀・伊勢を経て美濃に入り、大友皇子軍を近江国瀬田で打ち破

った。翌年大海人皇子は即位し天武天皇となり、律令国家の完成に向けて諸政策を施行するが686年、志半ばで病没する。この間、681年に末に都は飛鳥浄御原宮に移り、官人登用の法、甲子の宣の廃止、貴族・社寺の山・島・浦・林・池などの返還などが行わる。690年、庚寅年籍により良・賤の身分を区別し、年籍で確定する。692年には四畿内に班田大夫を派遣し、班田収授法を実施した。

その後、天武天皇の遺志を継いで持統天皇により、畝傍山・耳成山・香具山の大和三山を擁する平野に壮大な中国式都城、藤原京が建設される。694年、政治文化の中心は飛鳥を離れ、その北西に広がる藤原の地へと移る。律と令にそった政治を実施するため700年、王臣に令文を読習させ、律条の撰定作業に取りかかる。翌701年には完成し、702年、大宝律令を施行、日本史上初めての律令政治の始まりとなる。そして7年後の710年、平城京に遷都することにより奈良時代が幕をあける。

#### 4.3.2 飛鳥時代の文化

一方、飛鳥時代の文化に関しては、一般的に天智朝を境に前期を飛鳥文化、後期を白鳳文化と呼んでいる。飛鳥文化はそれまでの古墳文化に、百済・高句麗などを通じて新たに流入してきた中国南北朝時代の文化の影響が加わって生まれたものである。6世紀にわが国に伝えられた仏教が急速に発展し、わが国最初の仏教文化が花開くこととなった。蘇我氏の発願による飛鳥寺（法興寺）、聖徳太子の発願によるといわれる斑鳩寺（法隆寺）などが建造され、南北中軸線に基づいた寺域設定と瓦の使用が始められた。また堂塔などに堅い花崗岩を加工した礎石が利用され始めたのもこの時代の特色である。これらの新技術や寺院配置には、百済・高句麗文化の影響が認められる。

彫刻においては仏師鞍作鳥の作といわれる法隆寺金堂釈迦三尊像などに、北魏の仏像と共通する、整った厳しい表現がうかがえる。これら金銅像のほかにも、中宮寺や広隆寺の半跏思惟像、法隆寺の百済観音像などの木像が制作されている。絵画・工芸の分野においても、高句麗の僧、曇徴によって絵の具・紙・墨が伝えられるなど、大陸からの新しい技法の伝来によって飛躍的に発展した。また飛鳥時代の建築・工芸品に多く見られる忍冬唐草文様はエジプト・アッシリアに起こり、ギリシャで完成され、ペルシア・中国を経てわが国に伝わってきたと考えられている。

またこの時代には仏教の学問的な研究が始まり、聖徳太子が著したといわれる、法

華経・維摩経・勝鬘経の3つの教典の注釈書が伝えられる。また百濟の僧、観勒によって曆がもたらされ、年月の経過を記録するのが始まったのもこのころといわれる。

飛鳥時代の文学としては長歌・旋頭歌・短歌などが載せられた「万葉集」がよく知られている。万葉集には、飛鳥時代に登場する天皇、皇族、貴族をはじめ、柿本人麻呂・高市黒人ら、すぐれた歌人が飛鳥をうたった歌が数多く残されている。欽明天皇の天の香久山の国見の歌から、斉明朝の遠征、数々の遷都、壬申の乱、藤原新都の造営、大津王子の変、諸皇子の死など、歴史に伝える事件に際してつくられた歌も多く、そのほかの相聞や叙景の歌とともに、当時の人々の心情に接することができる。

以上のように、飛鳥時代の文化は仏教思想に基づき、様々な国際的文化要素と進んだ技術をもって創造されていったと考えられる。

## 4.4 川原寺について

本節では、提案手法を適用する実験対象として選択した川原寺の詳細について述べる。まず川原寺の創建年代に関する諸説を紹介し、現在の遺跡の状態を説明する。

次に発掘調査によって明らかになった建造物の構成について触れ、それをもとに提案されている復元案を検討する。

### 4.4.1 創建年代諸説

川原寺は現在奈良県高市郡明日香村川原にあり、法名を弘福寺(ぐふくじ)という。その創建の年代、経過はいまだに多くの謎にまつまれているが、当時は飛鳥寺・大官大寺・薬師寺とともに四大寺の一つに数えられ、飛鳥時代にきわめて重要な意義を持っていたと考えられている。川原寺の由来について、『川原寺縁起』[54]には以下のように述べられている。

*仰々川原寺は、皇極天皇御譲位の後創始したまうたと解せられ、飛鳥京官の四大寺の一であった。飛鳥川原にあるのを以て川原寺の名を得、一に弘福寺ともいふのである。孝徳天皇白雉四年旻法師寂するや、天皇は法師の為に書工狛堅部子麻呂や鮒*

魚戸直等に命じて多くの仏菩薩の像を造り、当寺に安置せしめたまうた、これを以て見れば当寺既に尋常の寺院ではなく、又相当の輪奐をそなえてゐたことを想像するに難くない。皇極天皇難波より還りますや、当寺に接した飛鳥河部の行宮に居まし、飛鳥板蓋宮に重祚したまうて後、その宮炎上するや行宮の址なる飛鳥川原宮に遷りまして、当寺を殊の外御信仰あそばしたと解せられる。[54]

上の記述によると、川原寺は皇極天皇の創建と考えられることができる。孝徳天皇が没したのち重祚して斉明天皇となられた皇極天皇は、飛鳥板蓋宮炎上後、川原宮に遷宮されたとある。

しかし実際には川原寺の創建年代に関して多くの異説が唱えられており、諸説の推定する創建は敏達天皇時代から奈良朝に至るまで実に約190年の開きがある。ここでは川原寺創建に関わる諸説の中から代表的なものを取り上げ、その根拠となる文献とともに概観してみたい。

### 1. 敏達天皇13年(584)創建説

『諸寺縁起集』に、川原寺は敏達天皇13年2月に蘇我馬子が建立した寺であり、金堂に丈6の11面観音像が祀られているという記述がある。

### 2. 孝徳天皇白雉4年(653)以前とする説

『日本書紀』白雉4年6月条に、孝徳天皇は旻法師が没するや法師の為に画工に命じて仏菩薩像を作らしめ、川原寺に安置したという記述がある。するとその時点で川原寺は既に存在していたと考えられる。

### 3. 斉明天皇元年(655)説

『元亨釈書』に、「斉明元年十月 冬、飛鳥川原宮に遷る。故に川原寺を営む。」とある。また『扶桑略記』には、「斉明元年十月、飛鳥板蓋宮火災けり。…(中略)…天皇飛鳥川原宮に遷幸す、川原寺を造る。」とあり、これらは共通して川原宮と川原寺の関係を記している、飛鳥板蓋宮が罹災したことは、『日本書紀』斉明天皇元年、是冬の条にも述べられているが、『元亨釈書』にはこの火災のことは触れられていない。

#### 4. 齊明天皇 7 年(661)説

『東大寺要録』に、「齊明天皇治辛酉七年建立」とある。しかし同年正月、齊明天皇は征西の途につき、7月には筑紫において亡くなられているので、この年に川原寺が創建されたとは考え難いという意見もある。

#### 5. 天智天皇時代とする説

福山敏男博士が『奈良朝時代の研究』[55]で述べられた説である。齊明天皇の死後、殯宮を飛鳥川原に定めたとあるが、当時寺を殯宮に当てた事実は見られないから、齊明天皇の代に川原宮の地に寺が建てられたとは考えられない。それ故、川原寺の創建は天智天皇の代、しかも大津宮時代以前と推測されている。

#### 6. 天武時代とする説

『日本書紀』天武 2 年 3 月の条に、「是月聚書生始写一切経於川原寺」とあり、仏教經典の集大成である一切経の写経を当寺で行ったという記述がある。

また『扶桑略記』天武天皇 15 年丙戌歳には「又、天皇建弘福寺」と記されている。すると同書は川原寺創建の記事を 2 回掲載していることになる。

#### 7. 光仁天皇宝亀 5 年(774)説

これは『太子伝古今目録抄』をもとにする説である。

以上のように、川原寺の創建年代については様々な説が提案されている。ここで参考のため、川原寺創建に関係があると思われる飛鳥時代の天皇在位期を図 41 に挙げる。

代	天皇名	読み	在位
33	推古天皇	すいこ	592年12月8日 - 628年3月7日
34	舒明天皇	じょめい	629年1月4日 - 641年10月9日
35	皇極天皇	こうぎょく	642年1月15日 - 645年6月14日
36	孝徳天皇	こうとく	645年6月14日 - 654年10月10日
37	齊明天皇	さいめい	655年1月3日 - 661年7月24日
38	天智天皇	てんじ	661年7月24日 - 671年12月3日
39	弘文天皇	こうぶん	671年12月5日 - 672年7月23日
40	天武天皇	てんむ	673年2月27日 - 686年9月9日
41	持統天皇	じとう	686年9月9日 - 697年8月1日

図 41 飛鳥時代の天皇在位期

乏しい文献資料をもとにした推論だけでは、十分な説得力をもった結論を下すことは困難である。そこで、昭和 32・33 両年度にかけて行われた川原寺の発掘調査の成果をまとめた『川原寺発掘調査報告』[56]を参照する。

本報告資料によれば、第 1 次調査終了直前に川原寺創建以前の遺構である暗渠発見されており、これは記録に残る川原宮のものではないかと推測されている。すると齊明天皇か天智天皇の創建説にしぼられることになるが、当時天皇の殯宮が仏寺に設けられた例が見られないということで、「川原寺の創建は天智天皇元年(662)以降、天武天皇 2 年(674)までの 13 年間に限ることができるだろう。」と述べられている。

しかしこれはあくまで下層遺構が川原宮であるという仮定をもとにした見解であるので、現実に検出された遺構が溝状遺構であり、また飛鳥地方にこのような性格の不明な遺構が検出される例があることなどから、川原宮の可能性であることを確定することはできないという反論[57]もある。

このようにして川原寺の創建については、いくつかの文献、伽藍遺構、出土瓦等の遺物から判断するに、少なくとも齊明天皇以後、天智朝初期までの間に絞ることができるのではないかという意見が提案されている。正確な創建年代の推定については今後の研究が待たれるところである。

### 4.3.2 沿革

天武朝より平城遷都までの期間、川原寺は官寺の一つとして重要な地位を占めていた。しかし平城遷都に際しては、大安寺、元興寺、薬師寺等の諸官寺は新都に移建されたにもかかわらず、ひとり川原寺のみは何故か飛鳥の地に止められている。そのため、奈良時代に入ると川原寺の地位は低下し、天平勝宝元年(749)「諸寺墾田地限」が定められたときも弘福寺は500町と、東大寺4000町、元興寺2000町などに比べればはるかに少ない面積しか認められなかった。

弘法大師御遺告、水鏡等によれば、天長9年(832)、空海は京都と高野山を往復する際の宿所として、川原寺を賜ったという。しかしこの遺告は空海の作ではなく、平安時代中頃の偽作ともいわれ、全面的に信頼することはできないと考えられている[56]。

その後、建久2年(1191)5月2日、『玉葉』によると貞慶は興福寺別当覚憲の使として関白九条兼実のもとに來り、「東寺末寺川原寺消失事」その他を報じたとされている。焼失の日時およびその後の復興が如何に行われたかは不明である。

江戸時代初期の延宝9年(1681)に開版された江戸期を代表する地誌『大和名所記』(『和州旧跡幽考』ともいう)によると、高市郡(現在の高取町と明日香村全域、桜井市、橿原市の一部を含む)内の仏寺として次の12ヶ所を挙げているが、その中に川原寺は数えられていない。

向原寺、石川精舎、大野丘塔、元興寺、飛鳥寺、大官大寺、国源寺、久米寺、法輪寺、子島寺、檜隈寺、壺坂寺

しかしそれから200年後の明治27年(1894)に奈良県庁が斎藤美澄に命じて制作させた『大和志料』に上げられた25ヶ所の寺院の中には弘福寺の名が挙げられている。[58]

現在当寺に残っている古い遺品としては、持国、多聞の二天像が存するのみである。両者ともかなりの損傷を蒙ってはいるが、その作風は古く平安時代初期にまで遡らせうるものがあるとされている[56]。

川原寺遺跡は大正13年3月3日、当時の史蹟名勝天然記念物保存法により史跡に指定され、保存の手段が講じられるようになった。昭和32・33年の発掘調査の後には埋め戻され、創建時の伽藍配置がわかるように礎石を並べるなどして整備され、現在に至っている。



図 42 現在の川原寺

### 4.3.3 発掘調査

昭和 29 年より農林省により大和平野灌漑導水路工事が実施されることとなり、その幹線が史跡地内を通過する計画が立てられたため、事前の発掘調査が必要となった。そこで文化財保護委員会は当時の奈良国立文化研究所にその事業を委託し、昭和 31・32 両年度に飛鳥寺の発掘調査、引き続いて昭和 32・33 両年度に川原寺の発掘調査を行うこととなった。

これ以前に川原寺に対して行われた発掘としては、大正 6 年 5 月にたまたま水田下より礎石が発見され、同様に水田下に埋もれていた多数の礎石が掘り起こされて一部は売却されるなどした経緯がある。折からの盆石や小石ブームで寺院が狙われて、1 個 500 円(当時小学校校長の月給は 30 円)相当で礎石が持ち出されたいらしい[59]。川原寺の礎石は瑪瑙の礎石と呼ばれる白大理石製で非常にめずらしく、日本古代寺院跡の中で全て大理石の礎石を用いた建物は川原寺の中金堂のみである[60]。白瑪瑙は白色でガラス光沢のある珪灰石を含む大理石で滋賀県大津市石山寺付近に産出することが知られている。

その後大正 14 年 12 月に当寺の内務省技官上田三平氏らによって金堂・塔土壇の実測と水田部分の一部発掘調査が行われ、その結果は『内務省史跡精査報告第三』に収録されている。しかしこの調査は小範囲に限られたため伽藍の全貌を明らかにするにはいたっていない。

以上の経緯を経て行われた昭和 32・33 両年度の発掘調査は奈良県教育委員会の協力を得て 3 回に分けて行われた。第一次調査は昭和 32 年 11 月 15 日から昭和 33 年 3 月 25 日まで伽藍南半部を中心に行われ、第二次調査は昭和 33 年 4 月 14 日から 5 月 18 日まで中金堂と塔土壇、そして第三次調査は昭和 33 年 11 月 14 日から昭和 34 年 2 月 14 日まで伽藍北半分に対して発掘が行われた。この結果、仏殿・塔から僧坊に至るかなり広範な伽藍主要部分の配置が明らかにされ、南方で隣接する橘寺との境界も判明した。

出土遺物としては瓦類、埴瓦、古銭、金銅製品、石燈籠、鉄釘、土器、陶磁器、木製品などが見ついている。この中で最も数が多く種類の上でも変化に富む瓦類については、従来より川原寺の最も典型的なものと知られていた、創建時代の複弁八弁鋸歯文縁軒丸瓦と四重弧文軒平瓦の組み合わせが全体の半数近くを占めていた。一般に飛鳥時代の軒丸瓦が単弁蓮華文に限られていたことが今日までの研究によって判明しているが、奈良時代以前にこれらとは全く系統を異にした複弁蓮華文が受

け入れられ、これが奈良時代後期から後代まで軒丸瓦の主流となったことも、早くより説かれてきたところである。ところがその複弁蓮華文軒丸瓦の最も古い確実な例は、川原寺のものであるといわれている[56]。

### ● 川原寺裏山仏教関係遺跡の調査

また昭和49年3月11日より、明日香村が主体となって、奈良県立橿原考古学研究所との共同のもとに、川原寺裏山(板蓋神社境内)仏教関係遺跡の発掘調査が行われた。その結果、焼失した寺院の遺物を埋納したものと思われる多数の埴仏、塑像、緑釉埴をはじめ、金銅金具、土器片、白鳳時代の軒丸瓦、軒平瓦、富寿神宝(818年初鑄)、承和昌宝(835年初鑄)の貨銭など、多数の資料が出土している[53]。これは前述の川原寺創建白雉4年(653)説の根拠となる『日本書紀』において、遣隋使として中国に渡り、帰朝して大化改新を指導し国博士となった僧旻が没した際に、多くの仏、菩薩像を造り、川原寺に奉納したという記載があることとの関連をうかがわせるものである。

埴仏とは粘土板に仏像を型取りし焼成したもので、尊像に独尊仏と三尊仏の型式があり、舟形と方形の2種類が知られている[57]。日本国内では50数箇所出土しているが、川原寺裏山遺跡で出土したものはそのほとんどが三尊埴仏であり、破片の数量およそ1,600点と、一ヶ所からの出土量としては他に比べるものがないほど多量である。

### 4.3.4 川原寺の構成

発掘調査の結果、中金堂の南に西金堂と塔が対面し、中金堂の北には金堂を配して僧坊で取り囲む一塔二金堂式の伽藍配置が判明した。このような伽藍配置は従来の四天王寺式・法隆寺式・薬師寺式などのいずれにも合致しない独自のものであり、現在は川原寺式伽藍配置の名で呼ばれている。以下に川原寺の主要な建築に関して、『川原寺発掘調査報告』[56]で述べられている考察と、『日本古代寺院造営の研究』[61]をもとに、概要を説明する。

### ● 中金堂

桁行5軒、梁間4軒のいわゆる三間四面仏殿で、基壇上面の高さは5尺と推

定される。入側柱礎石に地覆座を切り込み、身舎全体に仏壇を設けたと考えられる点は、法隆寺金堂創建時の状況とよく似ている。基壇は半ばほどが現本堂と庫裏の下になっている。礎石は28個が欠けることなく依存しており、これは瑪瑙の礎石と呼ばれる白大理石製の礎石で、非常にめずらしいものである。白瑪瑙は白色でガラス光沢のある珪灰石を含む大理石で滋賀県大津市石山寺付近に産出することが知られている。中金堂の基壇外装は残っていないが、東西約23.5メートル、南北19.5メートルの規模であり、北側で高さ約1.5メートルほどあることが確認されている。

## ● 西金堂

西金堂は、幅約0.9メートルの犬走り状下成基壇をもつ南北棟建物である。上段基壇は残されていないが、下成基壇内側の石列の状況から、南北約21.8メートル、東西約14.8メートルの規模と推定されている。基壇周辺の敷石のみ遺されているが、その形状は中金堂や塔で見られる花崗岩地覆上に、凝灰岩の羽目を置いた方式の基壇石積とは異なる、一風変わったもので、未だ類例を見ないものである。

## ● 塔

塔は1辺約6メートルで、柱間は等間である。基壇の1辺は約12メートルで、高さは約1.5メートル、外装は凝灰岩壇上積みである。基壇には幅約0.7メートルの犬走り状の下成基壇をもっており、心礎上面は基壇上面から約1.2メートルの深さにある。基壇は掘り込み地業で、丁寧な版築技法で築かれている。発掘調査の際に心礎据付後の版築土から、地鎮供養の際に納められたと思われる無文銀錢1枚と、金銅円板2枚が発見されている。

## ● 中門

中門は基壇がかなり高かったためにほとんど削平されており、礎石の据付痕跡も見つかっていない。しかし雨落溝から基壇の規模がわかっており、桁行3間、梁間2間と推定されている。基壇規模は東西約14.0メートル、南北約9.9メートルである。またこの地に「ロウモン」の字名が残されているので、門は

重層であったと推測される。

- **南大門**

発見された礎石は後世に動かされたものであり、基壇の大きさすら仮定しなければ決まらぬ程であるから、建物の規模は全く不明といってよい。しかし大正年間に掘り出したという礎石の位置を村人に確かめたところ、門は3間×2間の八脚門と推定されている。

- **廻廊**

廻廊は単廊で桁行・梁間ともに約3.8メートルで、中門へのとりつき部分は削平され、礎石・基壇ともに現存していないが、この部分はスロープ上になっていたと推測される。中金堂に対してはその南側柱列より約5寸北へずらせて、廻廊前面柱列を置く。また中金堂・中門の両脇廻廊を共に柱間8間に分割していることは、他に類例を見ない方式である。

- **講堂**

地下の掘込築土層の範囲が、そのまま築成されて建物基壇となるものと考えられ、東西134尺、南北約53尺の基壇が推定されている。これは飛鳥寺講堂や後世の奈良時代寺院の講堂と比べると、側面に対して正面が著しく長いことがわかる。この種の例は現在までに四天王寺講堂と法輪寺講堂の2例のみが知られており、さらにそれらは川原寺の例を含めて、ほぼ近い時代の創設と考えられている。建物部分については基壇上面を破壊されており、柱間寸法を復元するのは困難であるが、基壇寸法から仮に正面9間、側面4間もしくは3間で身舎一面のみ廂つきと想定することができる。

- **僧房**

僧坊は礎石・地覆石・基壇雨葛石などによって全容が推定されている。建物は梁間4間のうち、中庭に面した部分が吹き放しで、残り3間分が房となる。桁行柱間は2.3メートルの等間隔であり、2間分と3間分の大小2種類の部屋に分けられる。それらが一定の順序で並び、1ブロックが2・3・2間となって

いる。礎石上面の造り出しが僧房の内外を共通して丁寧にされており、また後世基壇床面が改修されていること等からみて、房の内部は土間であったと考えられる。

## ● 東門

東門は基壇上面が前面削平され、基底部分がわずかに残るのみである。礎石を抜き取ったあとの穴や、わずかに残っている雨落溝から、門の規模と築地遺構が明らかにされている。門は桁行3間、梁間3間と想定される。柱間寸法は桁行中央部分のみが約4.5メートルで、あとは桁行・梁間ともに約3メートルである。

以上の建物などから構成される川原寺の伽藍配置は、中金堂前庭に塔と西金堂を対置する独特なものである。ここで日本建築史における伽藍配置の変遷について補足すると、寺院の中枢をなす塔・金堂・僧坊などの建築は、古代においてかなり近接し、緊密な関係を保って計画されていたと考えられている[62]。伽藍配置については様々な類型があり、その発展過程についての解釈には諸説があるが、川原寺のものをはじめ、一般院古代の伽藍配置において代表的と考えられている形式を以下に挙げる。

## ● 川原寺式

本研究の対象である川原寺をもとにした伽藍配置。中門から発して金堂の両脇に達する廻廊に囲まれたなかに、東に塔、西に金堂を対置させる1塔2金堂形式。中金堂の北には講堂、経蔵、鐘楼を配して僧坊で取り囲む。一般に川原寺式と呼ばれる伽藍配置をもつ寺には、多賀城廃寺・南滋賀廃寺・観世音寺・陣内廃寺が上げられる。

## ● 飛鳥寺式

蘇我馬子によって立てられた日本最初の本格的な仏教寺院、飛鳥寺を基本とする形式。塔を中心としてその後方と両横に塔に面して堂が並び、これらを中門からおこる廻廊が取り巻き、講堂は廻廊の後方に建つ。1塔3金堂形式。

- **四天王寺式**

現在の大阪市天王寺区に位置する四天王寺をもとにする伽藍配置。南から、中門・塔・金堂・講堂が一直線に並び、それらを回廊が取り囲む。南北軸線に沿って主要建築が直線状に並ぶことに大きな特徴がある。

- **法隆寺式**

世界最古の木造建築として、日本で初めてUNESCOの世界文化遺産に登録された法隆寺をもとにする形式。中門の両脇から延びる廻廊によって形成される方形の内庭に、東に金堂、西に塔が南面して並立し、講堂は廻廊の北に位置する。

- **薬師寺式**

天武天皇が皇后の病氣平癒を祈願し、藤原京に創建した薬師寺を由来する伽藍配置。東塔と西塔の2塔1金堂の構成を持つ。以後の奈良時代の伽藍配置の基本となっている。薬師寺では2塔は金堂とともに廻廊で囲まれているが、その後は興福寺などのように塔が廻廊外に独立して建てられるようになった。

#### 4.4.5 復元案

現在、川原寺の詳細な復元案としては、飛鳥資料館[63]に展示されている川原寺1/100復元模型を挙げるができる。これは先の発掘調査によって得られた情報をもとに奈良文化財研究所が制作したものであり、『明日香村史』下巻、藤島亥治郎博士の論説[53]においては、

*この模型はよく研究せられたもので、私としては批評の限りではない。…(中略)…四面開放の廂の間のある中金堂は建築史上珍しい例として注目すべく、西金堂を単層としたことは次に記す飛鳥寺の復元案から見ても、適当な復元として賛意を表する。*

とあり、復元の正確さに関して専門家の高い評価を受けていることがわかる。

今回、川原寺のCGによる復元を行うにあたって、奈良文化財研究所[64]の大変なご好意により、この川原寺1/100復元模型の制作時に用いられた詳細な復元図面を提供していただけることとなった。図43、図44にこの復元図面の内容を示す。

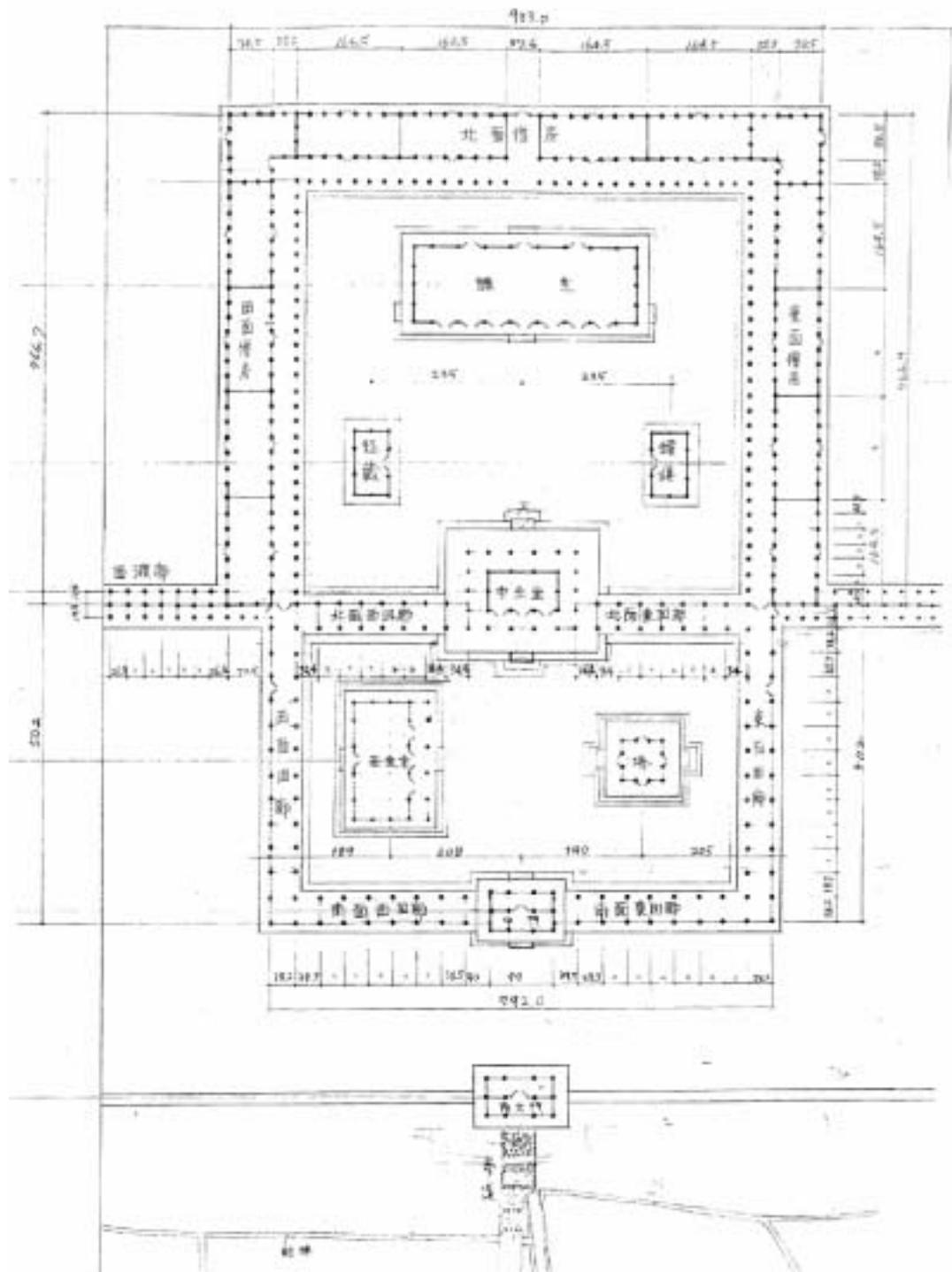


図 43 川原寺伽藍配置図  
 (奈良文化財研究所より提供)

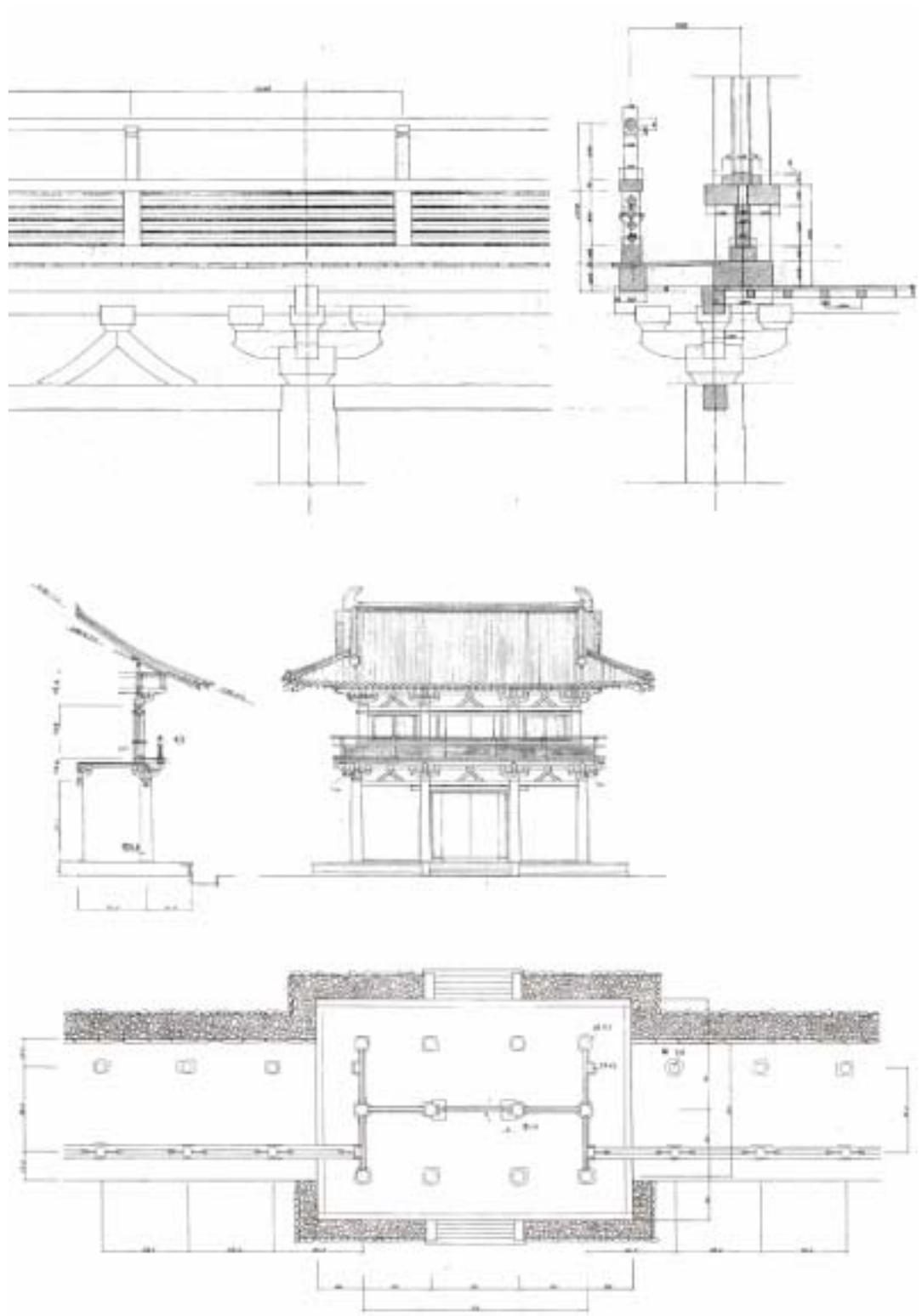


図 44 中門立面図・平面図・高欄詳細図  
 (奈良文化財研究所より提供)

## 4.5 復元 CG モデルの作成

### 4.5.1 モデリング作業

以上の復元図面をもとに、まず川原寺中門部分の復元 CG モデルの制作を試みた。モデリング作業には discreet 社の 3dsmax™ を使用している。図 45 にモデリングの作業画面を示す。

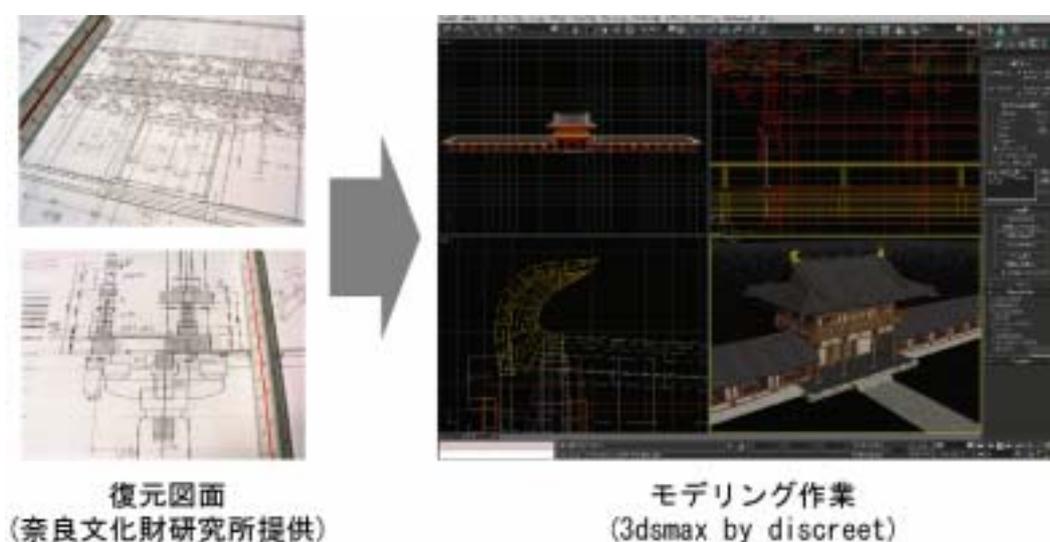


図 45 参照資料とモデリング作業画面

今回、川原寺のモデルを作るにあたって注意した点は、全体的に幾何形状を簡略化してポリゴン数を減らしながら、テクスチャ・マッピングによって部材細部や素材感を表現したことが挙げられる。この理由は本研究の最終的な目的が拡張現実システムでの実時間合成表示にあり、画像の描画処理にかかるコストを極力軽減することが求められたためである。また、復元図面から読み取ることのできない部分については、創建年代が近い寺院として唯一現存する法隆寺を参照した。現段階では木部や瓦などの素材感の表現も、現状の法隆寺を参考に作成している。次の図 46 に完成した中門の CG モデルを示す。



図 46 川原寺復元 CG モデル（中門部分）

また比較のため，図 47 に以前制作した東大寺大仏殿 CG モデルとの対比を示す．東大寺大仏殿のモデルはオフラインレンダリングによるアニメーション制作が目的であったため，肘木や墓股の曲面も忠実に作成している．東大寺大仏殿と川原寺中門のモデルでは規模も様式も異なることは明らかであるが，ワイヤフレームでの表示

比較において、部材細部の頂点密度が大きく異なる様子を見ることができる。実際には今回制作した川原寺中門モデルのように、適切なマッピング画像選択とテクスチャ座標の設定を行うことができれば、幾何的な情報量を削減しながら現実感を維持することが可能であるとわかった。

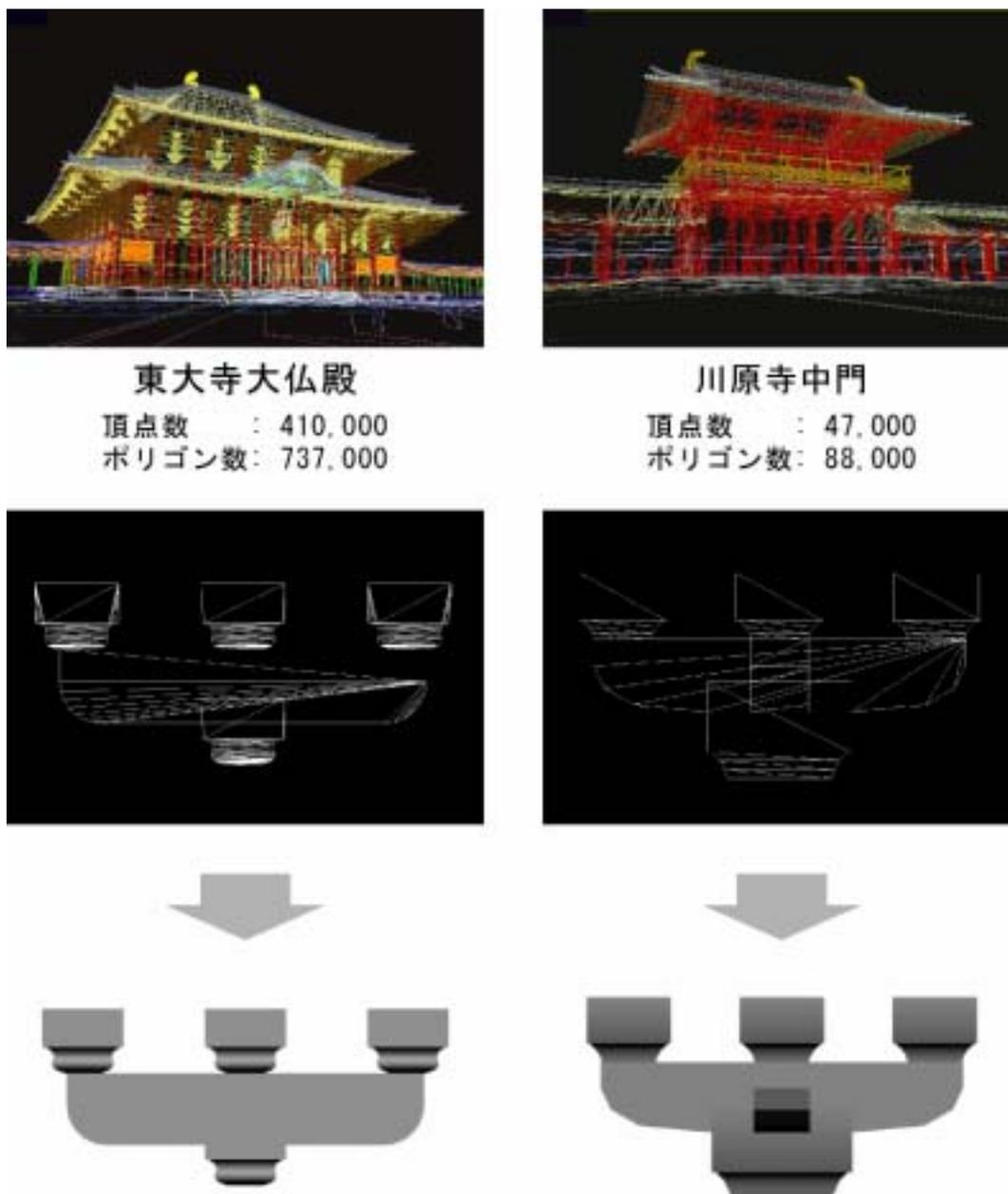


図 47 CG モデル細部の比較

#### 4.5.2 素材感の表現について

川原寺の創建当寺の状態を復元するにあたっては、建築物の形状だけではなく、部材表面の色や素材が如何なるものであったかを再現しなければならない。一般に当時の寺院は種々の顔料を用いて鮮やかに塗装されていたと考えられており、綿密な時代考証を経て近年実寸復元された平城宮朱雀門を見ても、木部は丹土、垂木木口は黄土、連子は緑青、天井は胡粉で塗られている様子うかがえる。そこで、復元CGにおいても忠実な色再現を試みるべく、実際の檜板に古建築顔料を塗ってデジタルカメラ(Canon EOS kiss)による撮影を行った。次の図48は木板に顔料を塗る過程を示している。また図49は晴天時の屋外環境において撮影された画像である。

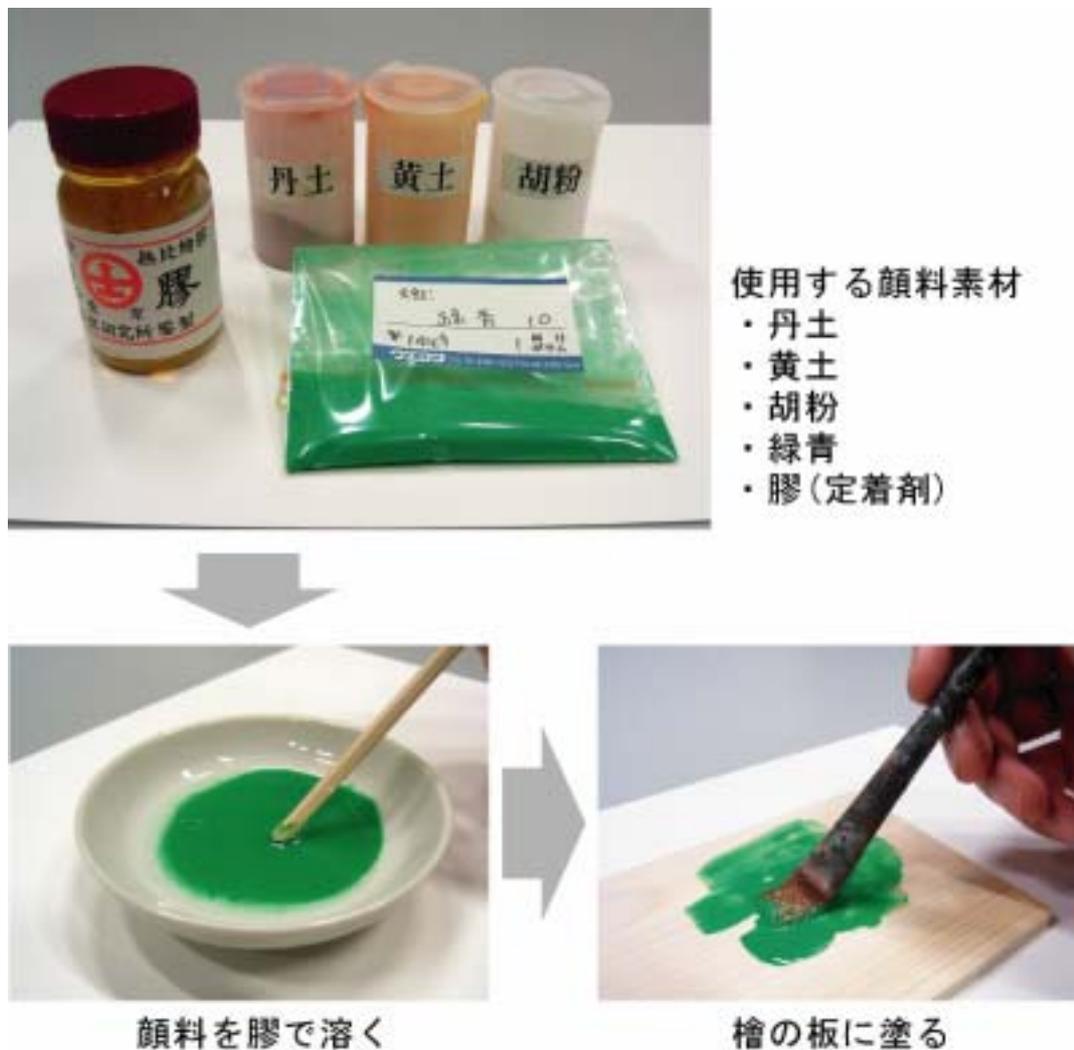


図 48 古建築顔料による木版への塗装過程

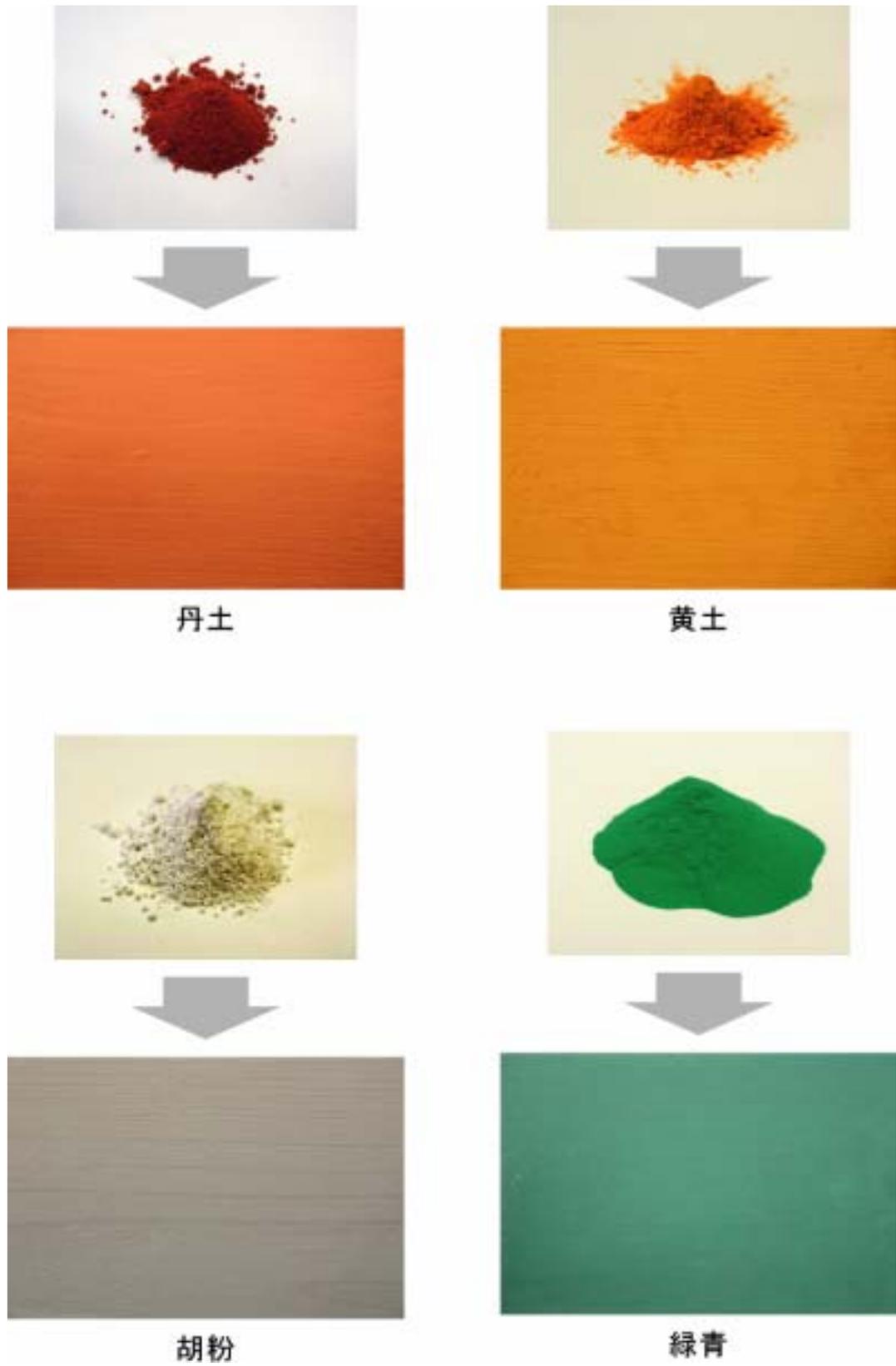


図 49 晴天時屋外環境で撮影した塗装木版の画像

以上のようにして、可能な限り創建時の状態に近い形で顔料の撮影を行ったが、顔料の塗装方法や撮影環境においてはまだまだ検討の余地が残されている。また最終的に PC モニター上で確認した色を HMD に表示させた段階で一致させるなど、表示する環境をも考慮した正確な色再現を行わなければならない。部材色の正確な再現については今後引き続き改善を行っていく予定である。

## 第 5 章 実験結果

明日香川 明日も渡らむ 石走の  
遠き心は 思ほえぬかも

『万葉集 卷 11-2701』

# 第5章 実験結果

本章では、まず実験に使用する機器について説明し、次に室内での実験および屋外での実験、さらに明日香村現地での実験について解説する。

## 5.1 使用機器

最初に実験で使用する機器について説明する。実験風景を次の図 50 に示す。



図 50 実験風景

本研究では拡張現実システムの構築にキャノン社の MR Platform[65]を用いている。MR Platform はビデオスルー型 HMD を用いて仮想環境と現実環境の合成を行う。HMD (VH-2002) は、撮像光学系と表示光学系の光軸を一致させた COASTER (Co-Optical

Axis See-Through Augmented Reality)型として世界初の実現令であり，小型軽量タイプながらすぐれた表示機能をそなえている．以下に HMD の外見と光学系仕様を記す．なお HMD 上部に見られる突起は位置合せ用磁気センサーの受信部である．



図 51 HMD (キヤノン VH-2002) の外観

項目		仕様
表示系	表示素子	VGA ( 92 万画素, 640 × 480 × RGB )
	表示画角	H51 ° × V37 ° ( 2m 先で 92 インチ相当 )
	眼間距離	63mm
	輻輳位置	2m
撮像素子	撮像素子	41 万画素 CCD
	撮像画角	H51 ° × V39 °
	パララックス	なし
	基線長	63mm
	輻輳位置	2m

図 52 ビデオシースルー型 HMD の仕様 (キヤノン VH-2002)

また，システムを構成する機器の外観と PC のスペック，および機材配線図を以下に示す．



MR Platform



トランスミッター

図 53 MR Platform の外観

項目	仕様
OS	Red Hat Linux 9
CPU	Pentium4
Clock	2.80GHz (FSB 800MHz)
RAM	1024Mbyte
Video Card	nVIDIA GeForceFX5950 Ultra
Capture Board	ViewCast Ospray-100

図 54 PC のスペック

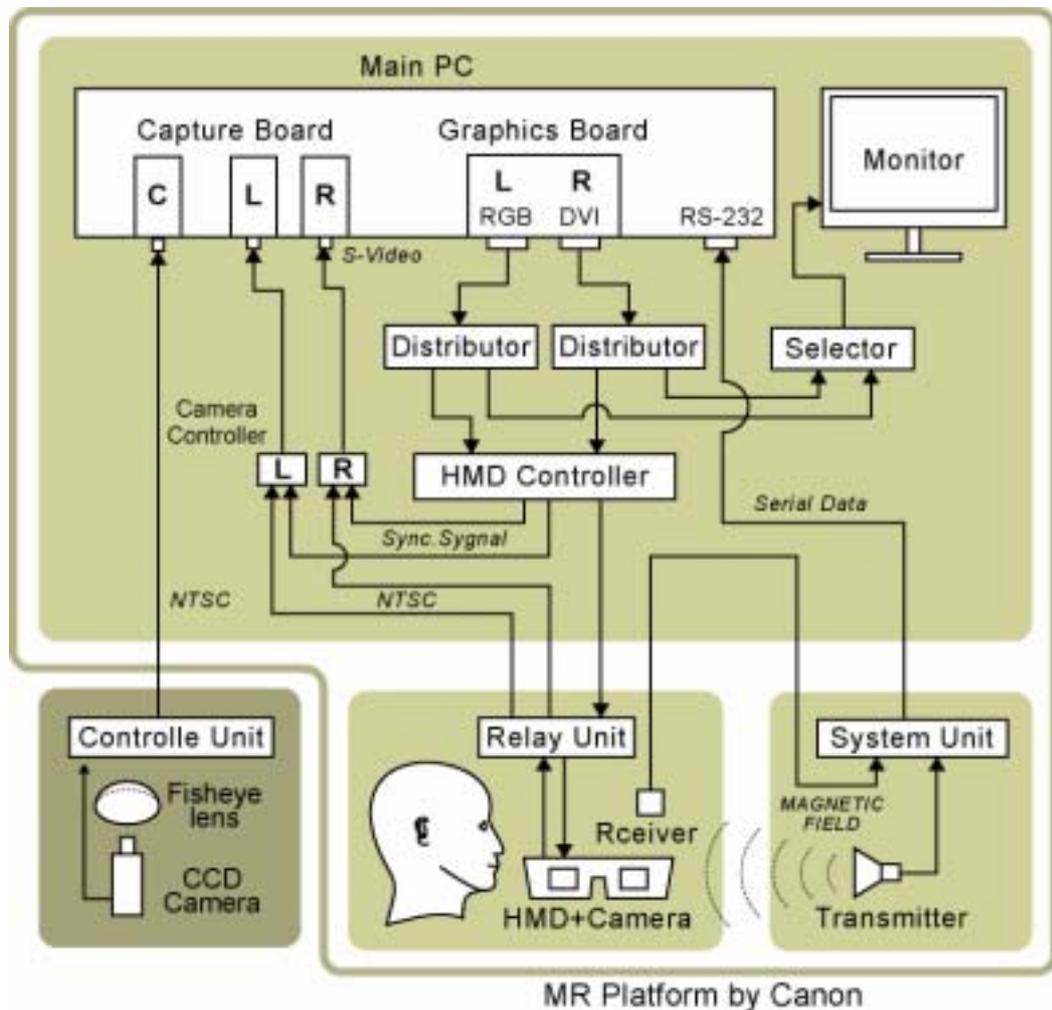


図 55 機材配線図

拡張現実システムにおける重要な課題である仮想物体と実画像の位置合わせについては、MR Platform の提供する 6 自由度位置姿勢センサとマーカを用いたビジョン手法の併用によるハイブリッド位置合わせ手法[66]の利用を検討した。

6 自由度センサには Polhemus 社の FASTRAK[67]を用いた。FASTRAK は磁界発生源のトランスミッターと、センサとなる磁力計測部、さらにそれらを制御するコントロールユニットから構成される磁気式センサである。磁気センサの特徴としては、非接触で計測でき、光学式や音波式と違って物理的な障害物に影響されないというメリットがある。磁気センサは高精度のモーションキャプチャーとして、VR や医療・各種シミュレーションに広く利用されている。しかし FASTRAK 磁気を用いるため、金属製の物体が周囲に存在すると磁界が歪み、制精度が低下するというデメリット

もある。そこでトランスミッターの設置台を木製で自作するなどして、磁界への影響を極力抑えるよう努力した。

次の図 56 は MR Platform の提供するツールを用いて、6 自由度センサーのキャリブレーションを行っているシーンである。現実世界に設置したマーカーを仮想世界の座標系に合せている様子がうかがえる。左の図に見えるように仮想世界の  $xz$  平面上に約 1cm 四方の赤色テープを貼り、これを目印に仮想世界と現実世界の座標軸の向きとスケールを一致させている。



図 56 磁気センサのキャリブレーション

しかしながら、本研究の目的である屋外アプリケーションでは、室内のテーブル上などの限定された環境と比べて、マーカーの設置が難しく、また史跡である敷地自体にあまり手を加えたくはないという配慮から、最終的にマーカーの使用は避けたいと考えている。さらに現地での実験においては機材の設置地点をその場の状況に合わせて調整することを予定していたため、事前に敷地内で座標系を想定しカメラから見える範囲にあらかじめマーカーを準備しておくことは困難であった。そこで以下の実験の位置合わせに関しては、FASTRAK 磁気センサーのみを用いている。屋外での拡張現実システムに適したスマートな位置合わせ方法を開発することは、今後の課題として残されている。

また一方、提案手法における実環境光源の取得のため、MR Platform に魚眼レンズ付きのビデオカメラを接続する。カメラは地表面より上側半球状の領域を撮影するため、鉛直上方向に向けて設置する。特に屋外で使用する場合は三脚と水平器を用

いて、正しい方向に向くように正確にセットした。ビデオカメラの仕様は以下のようになる。

項目	仕様
撮像素子	1/3 インチ インターライン CCD×3
有効画素数	38 万画素
色分解光学系	F1.4 RGB3 分解プリズム
感度	F5.6 2000lx
S/N	60dB
レジストレーション	0.05%

図 57 3-CCD カラービデオカメラ仕様 (Victor KY-F57)

## 5.2 室内実験

まずはじめに室内空間において、人工的に照明をセットした状態での実験を試みた。実験には単純なボックス型オブジェクトを用い、40の近似光源による地上面だけの基礎画像40枚を作成した。下の図58は実験風景を示している。



図 58 室内での実験風景

画面左側にはボックス状の木材（材質:チーク）を置き、これと同じスケールのCGモデルを隣に表示させることにより、比較を試みる。CG物体にはなるべく実物体に見えが近づくように画像処理した木材テクスチャをマッピングしている。なおモデルの設置位置には床面に約3cm四方の穴を開け、下方から魚眼レンズ付ビデオカメラで光源環境を撮影する。下の図59はカメラの設置状況を示す。

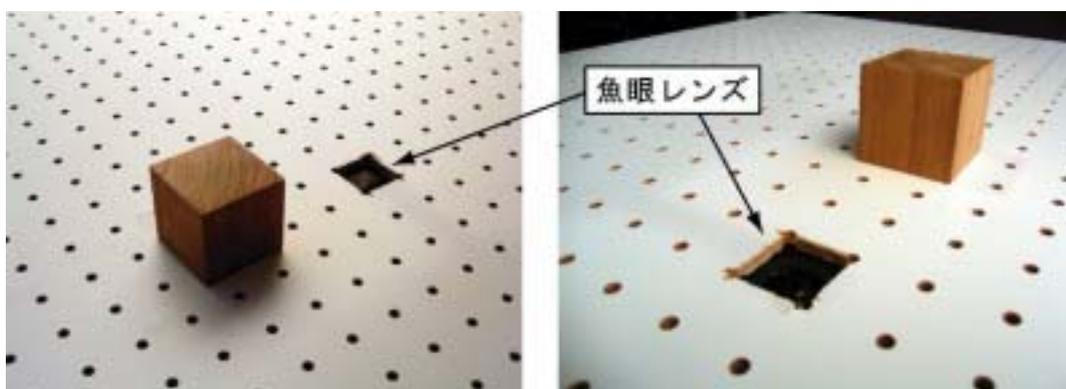


図 59 ビデオカメラの設置状況

下の図60はボックス型オブジェクトの地上面に落ちる影を記録した40の基礎画像

を示す。レンダリングにはシャドウマップ法を使用している。平行光源が低い高度から回転しながら上昇していくにともない、影は短くなり、また入射角が垂直に近づくことによって、面全体の明るさが増加していく様子が見られる。

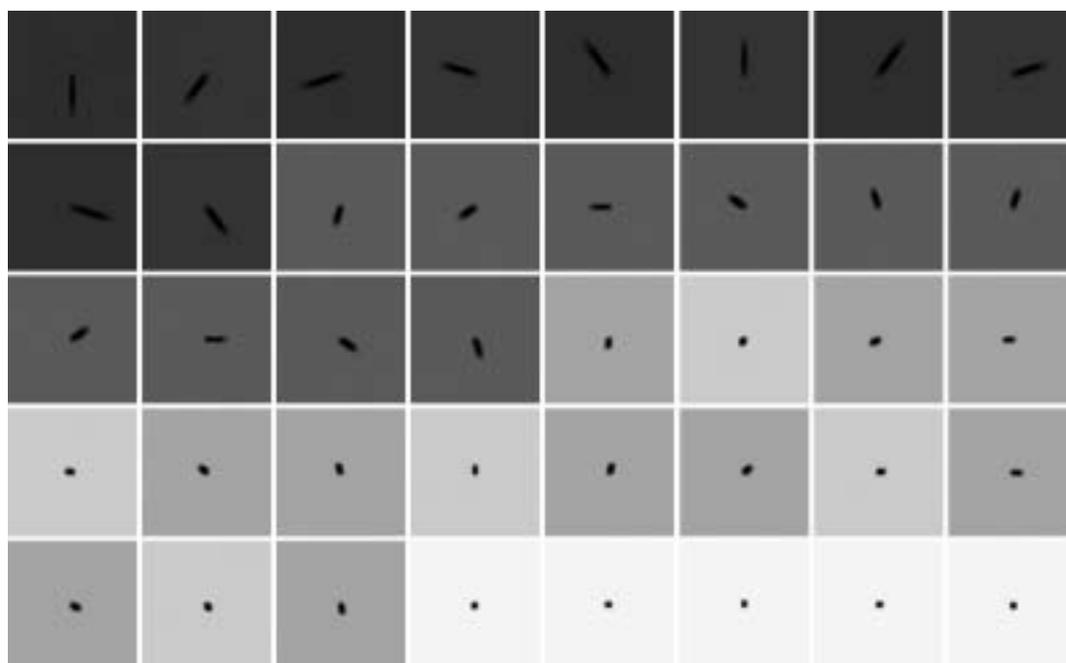


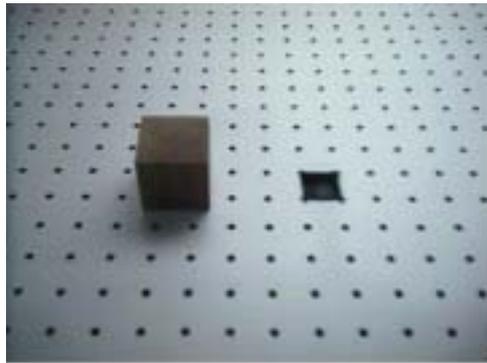
図 60 ボックス型オブジェクトの基礎画像（地表面）

以上の設定で仮想物体の表示を行った。次の図 61 は視点と光源を固定したまま、仮想物体にシェーディングと影付けの効果を加える過程を示している。CG 物体にまったくシェーディングを行わない場合は、すべての面が同じ明るさの平板な画像になっているが、実光源環境に対応したシェーディングを加えることでオブジェクトに立体感が生まれ、さらに影付けを追加することで実画像になじみ、あたかも隣の実物体と同様にその場に存在するかの印象を与えることに成功している。

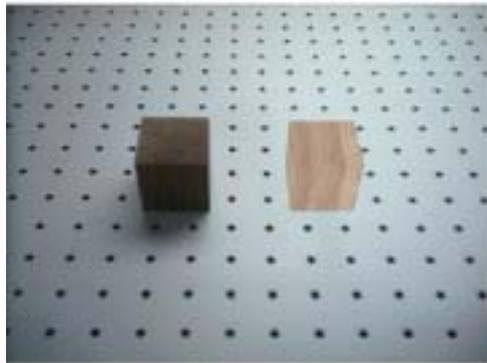
なおここで仮想物体の影に着目すると、若干実物体の影に比べて均一にぼやけてしまっているように見える。これは先にオフライン処理の節で述べた理由により、基礎画像をあらかじめぼかしていることから生じた影響であると考えられる。今後の研究によって、より多くの基礎画像を扱えるようになれば、光源のサンプリング数が増し影の再現性も向上するものと期待できる。

また実験用のシーンにおけるオブジェクトは、ボックス状仮想物体と影付け平面 1

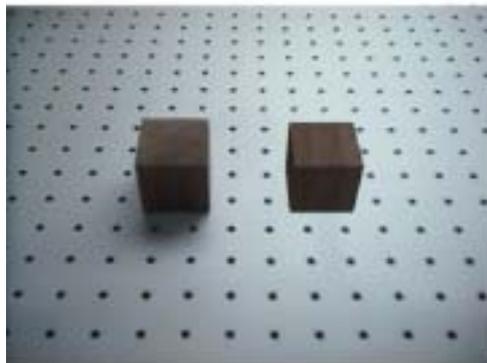
枚の合せて2つであり，頂点数は12，ポリゴン数は6である．この条件で毎フレームごとに40個の基礎パラメータを全方位画像から再計算し，同数の基礎画像を合成処理した場合でも，フレームレートは30を超え十分に実時間での影付け表現が可能であった．



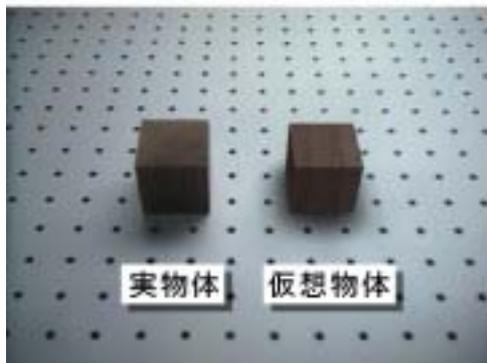
もともになる実画像



仮想物体を合成表示



仮想物体に  
シェーディングを追加



実世界の地表面に  
仮想物体の影付けを追加

図 61 シェーディング・影付け効果の比較

次に光源と視点がそれぞれ変化した場合に適切な陰影付けが行われるかどうかを確かめるために、カメラを固定したまま光源を移動する場合と光源を固定したままHMDカメラを移動させる場合の2通りについて、連続的に合成画像の取得を行った。それぞれの場合について、結果を説明する。

## 8. 視点固定・光源移動の場合

ここではHMDカメラを固定したまま照明を大きく左右に振った場合の影のつき方を観察する。次の図62は光源移動のアニメーションを静止画シーケンスで示したものである。光源が右から左へ動くことによって実物体の影と同様に、基礎画像から合成表示した仮想の影も変化している様子がわかる。

## 9. 光源固定・視点移動の場合

また今度は逆に、光源を固定したまま視点を移動する場合の観察を行った。オブジェクトに対して遠方から眺めた場合と近接して眺めた場合の2通りについて、対象の周囲を回転するようにカメラを動かした場合の合成画像を図63に示す。

仮想物体の影は3次元空間上の特定の平面にマッピングされ、仮想物体と同様の手順でレンダリングされているため、ユーザの視点移動に対しても、仮想物体との相対位置がずれることはない。そのため視点の移動に関しては、不自然な影のずれや誤差は見られなかった。

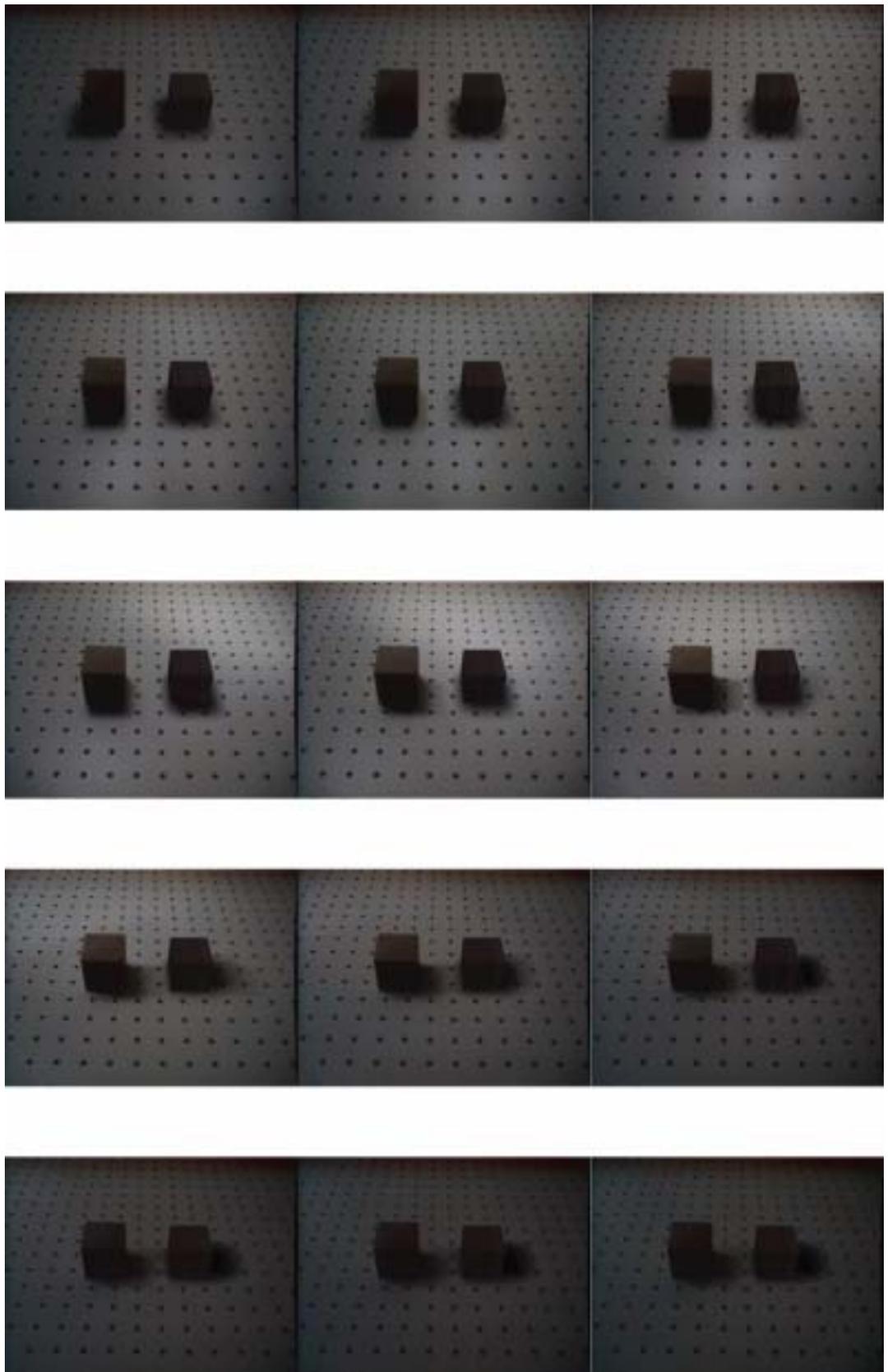


図 62 視点固定・光源移動の場合

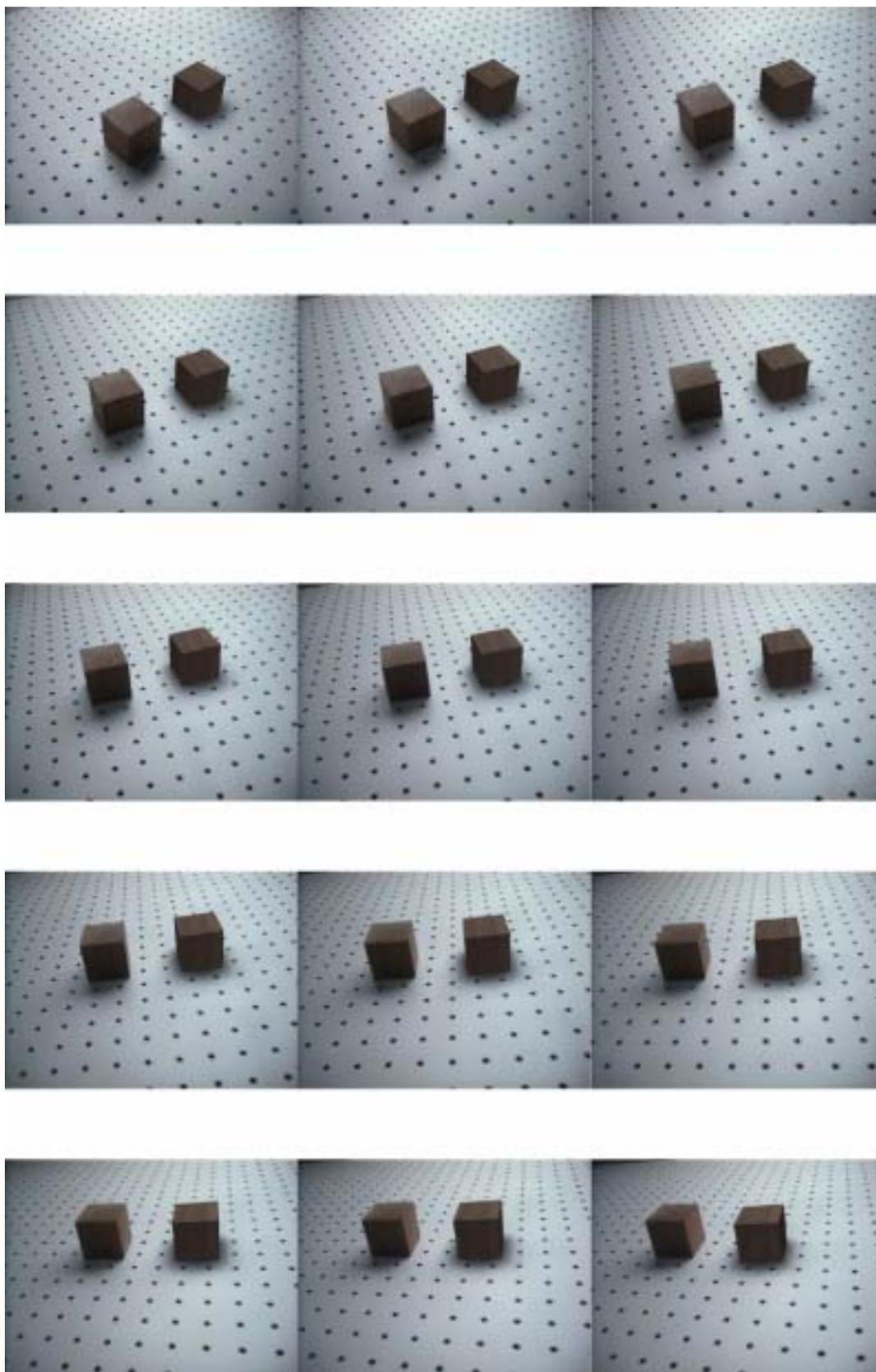


図 63 光源固定・視点移動の場合（遠景）

## 5.3 屋外実験

次に明日香村現地，川原寺跡での実験について説明する．まずオフライン処理での基礎画像の生成について述べ，次に実験結果の考察を行う．

### 5.3.1 基礎画像の生成

まず川原寺の CG モデルを用いて，基礎画像の生成を行う．実光源環境の近似に用いる光源数は第 3 章で説明した場合と同じく 40 とした．

また影付け平面に関しては，実験用モデルの中門および廻廊南側部分に対して，東西南面方向の合計 14 面を設定した．今回の対象である川原寺のような複雑な形状をもった CG モデルに対しては，組物などのユニットごとに影付け平面を準備することで，影の再現性をそれほど損なわずに，大幅に計算効率を上げることが可能である．

最終的に 40 の光源と 14 の影付け平面を用いて， $40 \times 14 = 560$  枚の基礎画像が生成されることになる．ところがここで気がつく点は，半球状に配した平行光源に対して地面と垂直に設置した影付け平面は，光源が視点の反対方向に回り込む場合に全く光が届かない暗黒面になってしまうことである．また同様に深い軒下に配置された影付け平面，は上方向からの照射に対して完全に庇の影に隠れてしまう場合がある．これらの状況から得られる基礎画像は，画像中のすべての部分の明るさが 0 であるため，後の線形和計算に対してなんらの寄与もないことは明らかである．

そこで基礎画像の中で完全に影に隠れた平面は除外するものとした．また残りの画像はグレースケールで 8bit のビットマップ形式とし，サイズは  $512 \times 512$  pixel とした．その結果，多くの垂直な影付け平面に関しては 40 枚中の半数以下に削減することができ，計算効率を大幅に向上させることができた．

以下の表に，実験で使用した影付け平面の設置場所と有効枚数を記す．

番号	設置場所	有効枚数(40枚中)
00	地面	40
01	一重壁南面	11
02	二重壁南面	11
03	一重壁上部南面	14
04	廻廊西側壁南面	14
05	廻廊東側壁南面	14
06	廻廊西側屋根南面	33
07	廻廊東側屋根南面	33
08	二重壁東面	10
09	二重壁西面	10
10	一重壁東面	16
11	一重壁西面	16
12	一重壁東面内側	6
13	一重壁西面内側	6

図 64 影付け平面の有効枚数

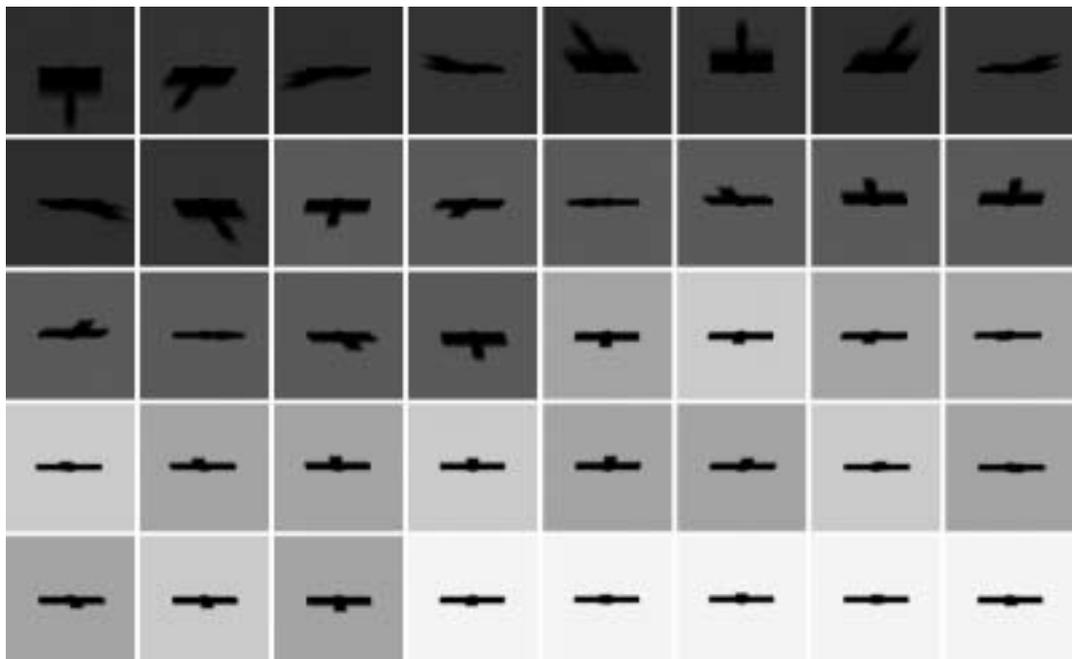


図 65 地面の基礎画像

拡張現実システムへの表示用モデルに関しては、描画速度の向上を図るため、視点から見えない部分を削除するなどしてデータ量の削減を行った。以下の表に実験用モデルの詳細を示す。

オブジェクト数	990
ポリゴン数	42,398
頂点数	23,176

図 66 実験用モデルの詳細

### 5.3.2 実験結果

ここでは奈良県明日香村川原寺跡にて実際に拡張現実システムを用いて合成表示を行った結果を説明する。次の図 67 は実験風景を示す。



図 67 現地での実験風景

また次の図 68 は合成に用いる実画像・仮想物体・影付け平面の画像をそれぞれ示し、影付け効果の比較を行っている。仮想物体に影付け処理を行うことで、合成画像の写実性が向上していることがわかる。

さらに次の図 69 では、時間の経過ともなう全方位画像と影の移り変わりを示す。太陽や雲の動きに応じて、影が次第に変化していく様子が見られる。

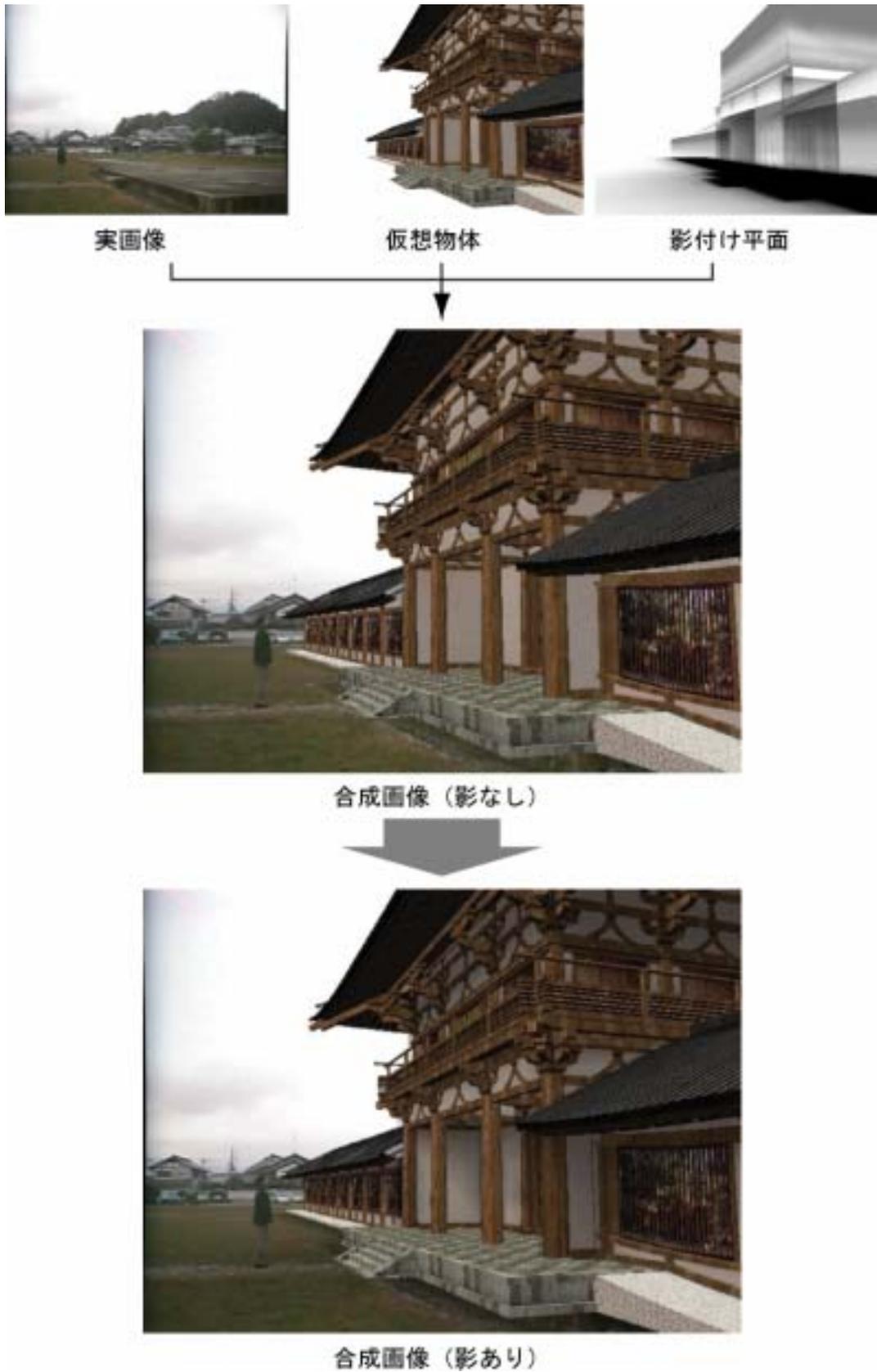


図 68 影付けの効果比較



図 69 時間の経過による影の移り変わり

### 5.3.3 処理の効率化に関する考察

図 70 に示すグラフは影付け処理に用いる基礎画像の枚数と、合成処理に要する時間の関係を示したものである。基礎画像が多いほど影の精度は向上するが、処理に時間がかかるということがわかる。そこで、基礎画像の枚数を一定数確保しながら、処理の効率化を図る方法をいくつか考案した。

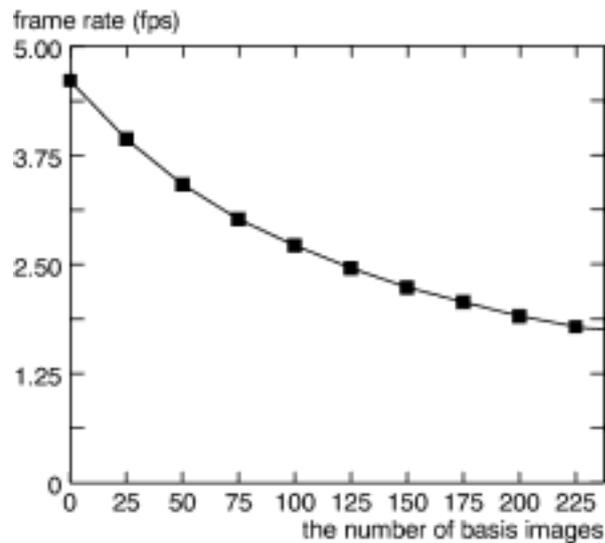


図 70 基礎画像枚数と合成処理時間の関係

- **輝度パラメータに閾値を設ける**

第 3 章で説明したオンライン処理の流れにおいて、輝度パラメータは実世界における光源環境の分布を表している。しかし全光源のなかで相対的に強度の低い光源から生じる影は、合成画像上であまり目立たないことがわかる。特に晴天時で影がくっきり現れる状況では、太陽とは逆方向の入射光によって落ちる影は視覚的にほとんど認知されない。そこで相対的に微弱な強度しか持たない光源領域からの寄与分を省くために輝度パラメータに閾値を設け、一定以下の強度では線形和計算から排除するようにした。

- **輝度パラメータの変化量に閾値を設ける**

屋外の光源環境を観察していると、大抵の場合において、太陽の運動や天候状況の変化に伴う光源分布の変化は比較的ゆっくりであることがわかる。例えば屋

外では、太陽が雲に隠れてあたりが急速に暗くなったり、またその逆で急速に明るくなる状況が起こりうるが、特に風速の強い日でなければ、このよう急激な変化はあまり頻繁に起こらないということが言える。そこで、輝度パラメータを毎フレームごとに再計算する手間を省くため、合成処理の前にまず前フレームとの変化量を計算し、一定の閾値以下の輝度パラメータについては線形和計算から除くようにした。また微弱な変化の蓄積に対応するため、一定時間ごとに強制的に全ての輝度パラメータを再計算する。これによって、あまり天候の変化しない屋外環境においてはほとんど影付けの再計算を行わないで済ませられることがわかった。

以上2つの工夫によって、影付け処理の部分における処理効率を向上させることができた。最終的なフレームレートは6.3FPSを記録したが、現段階では影付けを行わないモデルの描画処理のみで6.8FPSかかっているため、今後は影付け処理のみならず、モデルの描画にかかる計算コストを削減することが求められる。

## 第 6 章 結論

わが背子が 古家の里の 明日香には  
千鳥鳴くなり 島待ちかねて

『万葉集 卷3-268』

## 第6章 結論

近年、CGによる文化財の復元が盛んに行われるようになってきたが、制作したコンテンツやアーカイブをどのように運用・公開していくかという課題が生じている。そこで拡張現実感技術を用いて、遺跡現地で文化財の復元CGを表示する試みが行われている。

本研究では、拡張現実感における合成画像の光学的整合性の実現に向けて、実光源環境に対応した仮想物体の実時間陰影付け手法を提案した。奈良県明日香村川原寺跡の遺跡を対象に拡張現実システムによる伽藍の復元を行い、提案手法を実装した結果、仮想物体の陰影表現により合成画像の現実感を向上させることに成功した。

### 6.1 結論

本研究では行ったことは次の通りである。

#### 6.1.1 基礎画像を用いた仮想物体の陰影表現手法の提案

拡張現実感においては実時間処理が条件とされるため、CGモデルの影付け処理は難しいと考えられてきた。提案手法では、あらかじめ生成しておいた基礎画像の線形和から影を合成し、さらに3次元空間上の任意の平面にマッピングすることにより、観察者の自由な視点移動に対応した実時間影付け処理を行うことができた。

提案手法の処理の流れにおける要点は以下の通りである。

- **実環境光源を半球状面光源から多面体上の平行光源の集合に近似**
- **各近似光源によるオフラインでの基礎画像生成**
- **全方位画像の分析による輝度パラメータの取得**
- **輝度パラメータにより仮想シーンの光源輝度を決定**
- **基礎画像の線形和による影画像の合成**
- **影画像を影付け平面にマッピングし、仮想物体の影を表現する**

以上の手順をふまえて影付け処理を行うことにより、拡張現実システムの合成画像において仮想環境と現実環境の光学的な整合性を向上させることができた。提案手法ではオフラインで影のレンダリングを行うことにより、ソフトシャドウのような丁寧な影付けを行うことができる。またオンライン処理においては基礎画像からの合成により影を表現するため、拡張現実システムにおける実時間で処理に対応可能である。また従来手法と比べて、影付け平面への影画像マッピングにより、3次元空間内での任意の視点移動に対応することが可能となった。

### **6.1.2 屋外拡張現実システムの構築**

奈良県明日香村に位置する史跡、川原寺跡を対象に、屋外での拡張現実システムを構築した。遺跡のCG復元に関しては、文献資料や復元案図面を参考に綿密な調査を行ったうえで、データ量を調整しながら効率的なモデリングを行った。

寺院の復元モデルを対象に提案手法を実装し、室内実験と屋外実験の結果をふまえて明日香村現地での合成実験を行った。その結果、太陽や雲の動きに対応した仮想物体の陰影付けを行うことが可能となり、合成画像の現実感を向上させることができた。

## **6.2 今後の課題**

本論文は川原寺の拡張現実システムによる復元を目指したバーチャル川原寺プロジェクトの一環として、特に仮想物体における陰影表現に対して有効な手法を提案

することができた。今後プロジェクトを継続するにあたって、提案手法をさらに洗練し復元 CG の現実感を向上させるとともに、展示アプリケーションを実り多いものとするために、以下の観点から手法の改良が期待できる。

### 6.2.1 影付け処理の効率化

実験により本手法の適用に当たっては、毎フレームごとの合成計算に使用する基礎画像の枚数が大きな影響をもつことが確認できた。しかし実環境光源に正確に対応した影の表現を行うには、光源近似のサンプリング数を増やし、大量の基礎画像を生成しておくことが必要である。そこで多数の画像列を処理しながら実時間での描画更新を実現するような工夫が求められる。

そこで考えられる対策の一つは、基礎画像の線形和計算の並列化である。近年 CG の分野では、複数のテクスチャ画像を同一ポリゴン面にマッピングするために、多数のテクスチャユニットによる演算処理が可能となっている。マルチテクスチャと呼ばれるようなこれらの機能については、グラフィックボードなどのハードウェアによる並列処理が可能である。

提案手法の影付けアルゴリズムでは、複数の影付け平面に対してそれぞれの基礎画像を合成する繰り返し処理が行われるため、影付け平面や基礎画像枚数の増加は処理速度の低下を招くことになる。そこで各平面ごとの合成計算を並列化させることができれば、多数の基礎画像を用いながら一定の処理速度を維持することが可能になると期待できる。

### 6.2.2 太陽輝度の正確な取得

まず屋外での実験で直ちに明らかになった問題は、実環境光源撮影用カメラに対する太陽からの入射光が強すぎるという点である。全方位画像における太陽部分の輝度が空や建物などそのほかの部分の輝度よりも飛び抜けて高い値を示すために、筒通常の 24bit で表現できる階調では正確な明るさを取得することは困難である。これに対してカメラ側の絞りやシャッタースピードによる調整を行ったが、太陽部分に範囲を合せるならば他領域の階調が失われ、またその逆の場合には太陽部分が白く飛んでしまうなど、解決にはいたらなかった。これに対して考えられる対策のひとつは、露光時間を変化させて撮影をおこなうことにより、HDRI (High Dynamic Range

Image) を利用することが挙げられる。

### 6.2.3 光学的整合性の実現

また拡張現実感における仮想物体と実画像の光学的特性を一致させるためには、本論文で扱った陰影付け処理だけでは十分とは言い難い。特に実験結果で問題となったのは、ビデオシースルー型 HMD における撮影画像と CG 画像全体の明るさの不一致である。今後は仮想世界と現実世界のシーン全体の明るさを自動的に調整するような手法の開発が求められる。

### 6.2.4 川原寺全体の復元

本論文で作成した川原寺の CG モデルは、中門と廻廊の一部分のみである。引き続き金堂や塔などの主要建築物を作成し、伽藍全体の復元を目指したい。

また創建当寺の状態への復元を行うには、モデルの幾何形状やマッピングするテクスチャ画像について、より一層の検討が必要と考えられる。これから川原全体の CG による復元を行うにあたっては、古建築の専門家の指示を仰ぐなどして、歴史的・建築的に復元の精度を向上させることが必要と考えられる。

## 発 表 文 献

Tetsuya Kakuta, Takeshi Oishi, Katsushi Ikauchi,  
“Virtual Kawaradera: Fast Shadow Texture for Augmented Reality” ,  
VSMM 2004 (10th International Society on Virtual Systems and MultiMedia),  
November 2004, Gifu, Japan

## 参 考 文 献

- [1]Web3D Consortium, <http://www.web3d.org/>
- [2]Java 3D API, <http://java.sun.com/products/java-media/3D/>
- [3]奈良文化財研究所, “平城宮朱雀門”,  
<http://www.nabunken.go.jp/site/suzaku.pdf>
- [4]平城遷都 1300 年記念事業マスタープラン,  
<http://www.pref.nara.jp/1300/daigokuden/dai.html>
- [5]東京大学池内研究室  
<http://cvl.iis.u-tokyo.ac.jp/>
- [6]I. E. Sutherland, “Sketchpad: Man-machine Graphical Communications System”,  
Ph.D thesis, MIT, 1963.
- [7]技術編 CG 標準テキストブック編集委員会監修, 『技術編 CG 標準テキストブック』,  
東京, 財団法人 画像情報教育振興協会 (CG-ARTS 協会), 1999.
- [8] “Electronic Textbook on Computer Graphics”,  
<http://nis-lab.is.s.u-tokyo.ac.jp/~nis/CG/cgtxt/>
- [9]大成建設, ” 古代文明都市ヴァーチャルトリップ”,  
<http://www.taisei-kodaitoshi.com/>
- [10]大成建設設計本部 CG デザイン室, 『CG でよみがえる古代都市』, 東京,  
日経 BP, 1998.
- [11]凸版印刷, “トッパン VR システム”,  
[http://eb.toppan.co.jp/biz\\_info/contens/vr.html](http://eb.toppan.co.jp/biz_info/contens/vr.html)
- [12]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  
における歴史教育-”, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 8, No. 1, pp. 65-74, 2003.
- [13]R. Azuma, “A Survey of Augmented Reality”, Presence: Teleoperators and  
Virtual Environments, vol. 6, no. 4, pp. 355-38, 1997.
- [14]R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre,  
“Recent Advances in Augmented Reality”, IEEE Computer Graphics and  
Applications, 21(6), pp. 34-47, 2001.
- [15]田村秀行, “人工現実から複合現実へ”, OplusE, 新技術コミュニケーション  
ズ発行, 1998 年 3 月号.
- [16]Mark Weiser, “The Computer for the Twenty-First Century”, Scientific  
American, pp. 94-10, September 1991
- [17]Paul Milgram, Fumio Kishino, ” A Taxonomy of Mixed Reality Visual

- Displays” , IEICE Transaction on Information Systems, Vol E77-D, No.12  
December 1994.
- [18] I. E. Sutherland, “A Head-Mounted Three Dimensional Display” ,  
Proceedings of the Fall Joint Computer Conference, Thompson Books,  
Washington DC, 1968, 757-764.
- [19] 島津製作所, ” Data Glass 2” , <http://www.shimadzu.co.jp/hmd/>
- [20] 三菱電機, ” SCOP0” ,  
[http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/enterprise/personal/v\\_information/v\\_inf01.html](http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/enterprise/personal/v_information/v_inf01.html)
- [21] MicroOptical, <http://www.microoptical.net/>
- [22] eyetop, <http://www.eyetop.net/>
- [23] MICROVISION, <http://www.microvision.com/>
- [24] S. Feiner, B. MacIntyre, and D. Seligmann, ” Knowledge-based augmented  
reality” , Comm. ACM, Vol. 36, No. 7, pp. 52-62, 1993.
- [25] Boeing Mathematics and Computing Technology, “Technology Focus “,  
[http://www.boeing.com/assocproducts/art/tech\\_focus.html](http://www.boeing.com/assocproducts/art/tech_focus.html)
- [26] Jun Rekimoto, “NaviCam: A Magnifying Glass Approach to Augmented Reality  
Systems”, Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 6, No. 4 pp. 399-412,  
MIT Press, 1997.
- [27] A. Wagner, M. Rasse, W. Millesi, and R. Ewers, “Virtual reality for  
orthognathic surgery: the augmented reality environment concept” , J Oral  
maxillofac surgery 55, 456-462, 1997.
- [28] 筒井雅行, 近久博志, 小林薫, 阿保寿郎, “複合現実感による地下空間の可視  
化に関する実験的研究” , 土木学会第8回地下空間シンポジウム, 2002
- [29] W. J. Mitchell, 渡辺俊訳, 『e-トピア 新しい都市創造の原理』, 東京, 丸善株  
式会社, 2003.
- [30] 大島登志一, 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行, “RV-Border Guards:複数人参加  
型複合現実感ゲーム” , 日本 VR 学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 699-705, 1999
- [31] 2005 年日本国際博覧会 日立グループ館,  
<http://hitachi-pavilion.com/jp/02/mainshow.html>
- [32] Höllerer, T., Feiner, S., Terauchi, T., Rashid, G., Hallaway, H.,  
“Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile  
Augmented Reality System” , Computers and Graphics, 23(6), Elsevier, Dec.  
1999, pp. 779-785
- [33] 天目 隆平, 神原 誠之, 横矢 直和, “拡張現実感を用いたウェアラブル観光案  
内システム「平城宮跡ナビ」”, 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU2003-186,

Jan 2004.

- [34]H. Schnadelbach, B. Koleva, M. Flintham, M. Fraser, S. Izadi, P. Chandler, M. Foster, S. Benford, C. Greenhalgh, T. Rodden: The augurscope: a mixed reality interface for outdoors, Proc. CHI'02.
- [35]P. Daehne, J. Karigiannis: "ARCHEOGUIDE: System Architecture of a Mobile Outdoor Augmented Reality System", Proc. 1st Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp263-264, 2002.
- [36]G. Papagiannakis, M. Ponder, T. Molet, S. Kshirsagar, F. Cordier, N. Magnenat-Thalmann, D. Thalmann, "LIFEPLUS: Revival of life in ancient Pompeii", Virtual Systems and Multimedia, VSMM2002-invited paper, October 2002.
- [37]Wayne Piekarski and Bruce Thomas, ARQuake: The Outdoor Augmented Reality Gaming System, Communications of the ACM, 2002 Vol 45. No 1, pp 36-38.
- [38]Adrian David Cheok, Kok Hwee Goh, Farzam Farbiz, Wei Liu, Yu Li, Siew Wan Fong, Xubo Yang, Sze Lee Teo, "Human Pacman: A Wide Area Socio-Physical Interactive Entertainment System in Mixed Reality", CHI 2004.
- [39]田村秀行, 大田友一, "複合現実感", 映像情報メディア学会誌, vol. 52, pp. 266-272, 1998.
- [40]S. Feiner, B. MacIntyre, and D. Seligmann, "Knowledge-based augmented reality" Communications of the ACM, 36(2):53-62, 1993.
- [41]U. Neumann and Y. Cho, "A self-tracking augmented reality system", In Proceedings of the ACM Symposium on, Virtual Reality and Applications, pages 109-115, 1996.
- [42]M. Bajura, H. Fuchs, and R. Ohbuchi, "Merging Virtual Objects with the Real World: Seeing Ultrasound Imagery within the Patient", Proc. SIGGRAPH' 92, Vol. 26, No. 2, pp. 203-210, 1996.
- [43]A. Fournier, A. Gunawan and C. Romanzin, "Common Illumination between Real and Computer Generated Scenes", Proc. Graphics Interface ' 93, pp. 254-262, 1993.
- [44]P. E. Debevec, "Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography", Proc. SIGGRAPH 98, pp. 189-198, 1998.
- [45]I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 5, No. 1, pp. 1-12, 1999.
- [46]I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Illumination distribution from

- brightness in shadows: adaptive estimation of illumination distribution with unknown reflectance properties in shadow regions”, Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision (ICCV’99), pp. 875-882, 1999.
- [47] Segal, M., C. Korobkin, R. van Widenfelt, J. Foran, and P. Haeberli, “Fast Shadows and Lighting Effects Using Texture Mapping”, Computer Graphics (SIGGRAPH ’92 Proceedings), pp. 249-252, 1992.
- [48] Herf, M., and P.S. Heckbert, “Fast Soft Shadows”, Visual Proceedings (SIGGRAPH 96), p. 145, August 1996.
- [49] Soler, C., and Sillion, F. “Fast calculation of soft shadow textures using convolution”, Computer Graphics SIGGRAPH ’98 Proceedings, 321-332, 1998.
- [50] 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, D-2, Vol. J84-D-2, pp. 1864-1872, 2001.
- [51] 国営飛鳥歴史公園, <http://www.asuka-park.gr.jp/>
- [52] 明日香村ホームページ, “明日香法について”  
<http://www.asukamura.jp/asuka-ho.html>
- [53] 明日香村史刊行会, 『明日香村史』全3巻, 明日香村, 明日香村史刊行会, 1974.
- [54] 川原寺縁起
- [55] 福山敏男, 『奈良朝寺院の研究』, 綜芸社, 1978.
- [56] 奈良文化財研究所, 『川原寺発掘調査報告』, 奈良, 奈良文化財研究所, 1960.
- [57] 網干善教, NHK取材班, 『謎の大寺 飛鳥 川原寺』, 東京, 日本放送出版協会, 1982, p. 45-46.
- [58] 河上邦彦, 菅谷文則, 和田萃編, 『飛鳥学総論』, 京都, 人文書院, 1996, p. 289-290.
- [59] 寺尾勇, 『飛鳥歴史散歩』, 大阪, 創元社, 1972, p. 115.
- [60] 網干善教, 『飛鳥の遺蹟』, 京都, 駸々堂, 1978, p. 78.
- [61] 森郁夫, 『日本古代寺院造営の研究』, 東京, 法政大学出版局, 1998.
- [62] 日本建築学会編, 『日本建築史図集』, 彰国社, 1997.
- [63] 飛鳥資料館, <http://www.asukanet.gr.jp/>
- [64] 奈良文化財研究所, <http://www.nabunken.go.jp/>
- [65] キヤノン, MR Platform,  
[http://www.cssi.co.jp/multimedia/mr/mr\\_platform\\_system/top.html](http://www.cssi.co.jp/multimedia/mr/mr_platform_system/top.html)
- [66] 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 (ISMAR 2002), pp. 246-253 (2002. 9)
- [67] Polhemus, FASTRAK, <http://www.polhemus.com/fastrak.htm>

[68]明日香村ホームページ, <http://www.asukamura.jp/bunkazai/bunkazai.html>

[69]奈良文化財研究所, 『奈良文化財研究所創立 50 周年記念 飛鳥・藤原京展 -古代律令国家の想像-』, 朝日新聞社, 2002.

# 付 録

## 付録 A. 明日香村の国指定文化財[68]

種別	名称	指定年月日
特別史跡	高松塚古墳	昭和 47. 6. 17
特別史跡	キトラ古墳	平成 12. 7. 31
史跡	川原寺跡	大正 10. 3. 3
史跡	大官大寺跡	大正 10. 3. 3
史跡	牽牛子古墳	大正 12. 3. 7
史跡	中尾山古墳	昭和 2. 4. 8
史跡	酒船石	昭和 2. 4. 8
史跡	定林寺跡	昭和 41. 2. 25
史跡	飛鳥寺跡	昭和 41. 4. 21
史跡	橘寺境内	昭和 41. 4. 21
史跡	岩屋山古墳	昭和 43. 5. 11
史跡	伝飛鳥板蓋宮跡	昭和 47. 4. 10
史跡	飛鳥水落遺跡	昭和 51. 2. 20
史跡	飛鳥稻淵宮殿跡	昭和 54. 3. 20
史跡	マルコ山古墳	昭和 57. 1. 16
史跡	飛鳥池工房遺跡	平成 13. 8. 13
史跡	檜隈寺跡	平成 15. 3. 25
史跡・名勝	飛鳥京苑池	平成 15. 8. 27

種別	名称	指定年月日
国宝	木心乾漆義淵僧正坐像	昭和 32. 2. 19
国宝	高松塚古墳壁画	昭和 49. 4. 17
重要文化財	天人文甌	明治 30. 12. 28
重要文化財	塑像如意輪観音坐像	明治 34. 8. 2
重要文化財	木造仏涅槃像	明治 42. 9. 21
重要文化財	岡寺仁王門	昭和 30. 6. 22
重要文化財	銅像如意輪観音半跏像	昭和 32. 8. 1
重要文化財	岡寺書院	昭和 61. 1. 22
重要文化財	木造日羅立像	明治 34. 8. 2
重要文化財	木造如意輪観音坐像	明治 42. 9. 21
重要文化財	木造聖徳太子坐像	明治 42. 9. 21
重要文化財	木造地藏菩薩立像	明治 42. 9. 21
重要文化財	木造だ太鼓縁	明治 42. 9. 21
重要文化財	絹本著色太子絵伝	昭和 33. 4. 7
重要文化財	石燈籠	昭和 37. 2. 2
重要文化財	木造持国天・多聞天立像	明治 34. 8. 2
重要文化財	銅像釈迦如来坐像	昭和 15. 10. 14
重要文化財	於美阿志神社石塔婆	明治 42. 4. 5
重要文化財	高松塚古墳出土品	昭和 49. 4. 17
重要文化財	石造男女像	昭和 55. 6. 6
重要文化財	石造須弥山石	昭和 55. 6. 6
重要文化財	牽牛子古墳出土棺飾金具	昭和 12. 3. 3

付録 B. 飛鳥時代略年表[69]

西暦	年号	主な出来事
538	欽明 7	仏教伝来（元興寺縁起・法王帝説） （『日本書紀』は 552 年とする）
588	崇峻元	飛鳥衣縫造樹葉の家を壊して飛鳥寺を造り始める
592	崇峻 5	飛鳥寺の仏道と歩廊を建てる
〃	〃	推古天皇豊浦宮にて即位する
593	推古元	飛鳥寺の塔心礎に仏舎利を納める
603	推古 11	小墾田宮に遷る
〃	〃	冠位十二階を定める
604	推古 12	聖徳太子，憲法十七条を作る
607	推古 15	小野妹子を隋に派遣する
609	推古 17	飛鳥大仏完成（元興寺縁起）
612	推古 20	百済の路子工に命じて，小墾田宮南庭に須弥山と呉橋を作らせる
630	舒明 2	犬上御田鍬を塔に派遣する（初の遣唐使）
〃	〃	飛鳥岡本宮に遷る
636	舒明 8	岡本宮焼亡，田中宮に移る
639	舒明 11	百済川の側に大宮と大寺を造り始める
640	舒明 12	百済宮に遷る
641	舒明 13	山田寺を造り始める（法王帝説裏書）
643	皇極 2	山田寺金堂を建てる（法王帝説裏書）
644	皇極 3	蘇我蝦夷・入鹿，家を甘樫丘に並べ建て，宮門と称する
645	皇極 4	蘇我入鹿暗殺（乙巳の変）
645	大化元	難波長柄豊碕宮に遷る
646	大化 2	改新の詔を発する
649	大化 5	蘇我倉山田石川麻呂，山田寺で自害
653	白雉 4	中大兄皇子，皇極天皇とともに倭京へ移る

西暦	年号	主な出来事
655	斉明元	飛鳥板蓋宮焼亡，飛鳥川原宮に移る
656	斉明 2	後飛鳥岡本宮に遷る
〃	〃	田身嶺に垣を巡らせ，両槻宮を造る
〃	〃	香山の西より石上山に至る溝を掘り，船で石を運んで垣を作る
657	斉明 3	飛鳥寺の西に須弥山の像を作る
659	斉明 5	甘櫓丘の東の川上に須弥山を作る
660	斉明 6	中大兄皇子，漏刻を作る
〃	〃	石上池のほとりに須弥山を作り，肅慎を饗応する
662	天智元	僧道昭，飛鳥寺の東南隅に禅院を建てる（三代実録）
663	天智 2	白村江の戦い
〃	〃	山田寺の塔を建て始める（法王帝説裏書）
667	天智 6	近江大津宮に遷る
670	天智 9	庚午年籍を作る
672	天武元	壬申の乱
〃	〃	飛鳥浄御原宮に遷る
673	天武 2	美濃王らを造高市大寺司に任命する
676	天武 5	山田寺の塔完成，露盤を設置する（法王帝説裏書）
677	天武 6	多禰嶋の人々を飛鳥寺の西の槻の下で饗応する
〃	〃	高市大寺を大官大寺と改める（大安寺縁起）
680	天武 9	皇后（後の持統天皇）の病氣平癒を祈願して薬師寺を造る
682	天武 11	隼人を飛鳥寺の西の槻の下で饗応する
683	天武 12	銀錢使用を禁じ，銅錢使用を命じる
684	天武 13	天武天皇，京師を巡行して宮室の地を定める

西暦	年号	主な出来事
685	天武 14	山田寺の丈六仏像開眼（法王帝説裏書）
〃	〃	天武天皇，山田寺・川原寺に行幸する
〃	〃	天武天皇，白錦後苑に行幸する
686	朱鳥元	大津皇子，謀反の罪により死を賜る
688	持統 2	天武天皇を大内陵に葬る
689	持統 3	飛鳥浄御原宮令を施行する
691	持統 5	新益京の地を鎮める祭りを行う
692	持統 6	藤原宮の地を鎮める祭りをを行う
694	持統 8	大宅朝臣麻呂らを鑄銭司に任命する
〃	〃	藤原宮に遷る
698	文武 2	薬師寺ほぼ完成，僧侶を住まわせる
699	文武 3	大官大寺に九重塔を建てる（扶桑略記）
〃	〃	鑄銭司を置き，中臣朝臣意美麻呂を長官とする
700	文武 4	僧道昭死去，栗原にて火葬する
701	大宝元	大宝律令完成
702	大宝 2	大宝律令を施行する
〃	〃	栗田真人らを唐に派遣する
708	和銅元	和同開珎発行
710	和銅 3	平城京へ遷都