

# VR/MR 技術を用いた歴史観光のIT活用に関する研究

佐藤 啓宏

電気通信大学 大学院 情報システム学研究科

博士(工学)の学位申請論文

2016年6月

# VR/MR 技術を用いた歴史観光のIT活用に関する研究

## 博士論文審査委員会

主査 工藤 俊亮 准教授

委員 末廣 尚士 教授

委員 広田 光一 教授

委員 佐藤 俊治 准教授

委員 古賀 久志 准教授

著作権所有者

佐藤 啓宏

2016

# IT application using VR/MR technology for tourism in historical sites

YOSHIHIRO SATO

## Abstract

There is demand for new-style tourism. Tourism is expected as one of big industries that support our country. Under such a background, IT application is brought to attention to increase appeal of sightseeing spots. Previous studies on tourism showed that motive of tourists consists of a five-step cycle: motivation, learning, visit, impression, and re-visit. In order to supports each step by using IT technology, a concept of smart tourism is proposed. One of the biggest issues in the concept is methods to enhance appeal of sightseeing spots. Virtual Reality (VR) and Mixed Reality (MR) technologies are often used for promoting impression of tourists, for example utilizing digital archives.

In this thesis, we proposed practical methods for new historical tourism using VR/MR and digital archiving technologies. We prepared VR/MR contents restoring ancient buildings and landscapes using computer graphics, developed a mobile VR/MR system that is usable in outdoor environment, and evaluated the effect of VR contents on tourism in historical places. In addition, from the view of making use of travelling time, we tried to use VR/MR contents for

entertainment during traveling on spot to another.

As there are few examples of VR/MR application for tourism, many problems still exist in both operational and technical aspects. In the thesis, two types of operation are conducted:

1. Guided tours supported by mobile VR/MR systems.
2. MR mobility system in transportation for many tourists.

As sightseeing events, we recruited participants from general tourists, and investigated possibility of the proposed applications with questionnaires. As the result, we confirmed usefulness and future issues of tourism application of VR/MR.

# VR/MR 技術を用いた歴史観光のIT活用に関する研究

佐藤 啓宏

## 論文概要

観光の新しい形が求められている。わが国の経済を支える大きな産業の一つとして、観光業に大きな期待が集まっている。観光地の魅力を高めるために、観光資源を抱える各地の自治体では様々な模索を続けており、観光の IT 活用はその目玉となっている。インターネットを利用した観光案内は広く普及し、すでに多くの旅行者が使用する社会インフラとなっている。差別化のために新しい技術が積極的に試まれており、バーチャルリアリティ(VR)やミックスリアリティ(MR)はその一つである。

観光の心理学的分析によれば、観光が動機づけ・学習・訪問・感動・再訪のサイクルで成り立つとされている。各段階を IT 活用によって魅力的にしようという提案がなされており、スマートツーリズム構想として知られている。とくに訪問先の現地の魅力をよりよく伝えて感動を深めるための手段が課題となっている。文化財をデジタルデータ化する技術はデジタルアーカイビングと呼ばれ、VR/MR 技術を用いてデジタル化された文化財を鑑賞する試みがなされており、感動深化のために観光への融合が標榜されている。

本研究では、VR/MR を使ったデジタルアーカイブの展示の観光応用を試み、実用化へ向けた提案を行う。古代飛鳥京があった奈良県高市郡明日香村において、飛鳥時代を題材にして往時の建物や街並みを CG を用いて仮想復元した VR コンテンツを制作し用意した。遺跡が存在したとされる場所において VR コンテンツを鑑賞できるように、屋外で使用できる歴史体験端末を開発し実証実験を行った。とくに観光応用における課題の一つが移動にあると見定めて、移動中に VR/MR コンテンツを楽しむことのできる運用を試みた。

VR/MR の観光応用は実例が少ないため、大小さまざまな課題が残されている。そこで次の 2 つの形式の運用を試みた。

- ・ガイドツアーのサポートツールとしてモバイル型 VR/MR 装置を用いる運用
- ・多人数が同時に移動しながら体験できる MR モビリティシステムとしての運用

観光イベントとして一般の訪問客から参加者を募り、体験終了後にアンケート調査の協力をお願いし、観光応用の可能性を調査した。その結果、VR/MR の観光応用の有用性と課題を確認できた。VR/MR を観光に導入する大きな目的は観光地の魅力を深めて観光客に現地に足を運んでもらうことであり、歴史観光体験の感動の深化を VR/MR 技術で実現するための課題と要件を検討してい

く.

VR/MRの観光応用に関する課題は、運用面における課題および技術面における課題の2つの側面がある。運用面における課題は、環境を壊さない導入方法、従来のサービスを壊さない導入方法、現地における運用、コミュニケーションの促進、移動の有効活用が重要であると考え、2つの試行の結果を基に解決方法の検討をおこなった。ガイドツアーのサポートツールとしてモバイル型VR/MR装置を用いる運用では、特に運用者が現地のボランティアガイドであることに留意して、システムを受け入れてもらいやすいように近いしやすく使いやすいようにすることに配慮した。技術優先とせず、従来の観光サービスを後押しするようにVR/MRシステムを導入することが重要であると考え。

技術面での課題は、現時点では特に音による臨場感の向上、VR/MR特有のコンテンツ編集コストの削減手法が重要であると考えた。MRモビリティシステムを用いた運用において、移動に伴い場面が転換していくようなストーリー仕立ての演出を行うことでエンターテインメント性の向上が期待できる。観光においてエンターテインメント性は重要な要件の一つである。移動中のユーザーの位置・姿勢に伴って、映像とともに音も空間を持った表現にすると臨場感を向上できる。また、映像を360度任意の方向に眺める自由が与えられている多くのMRシステムのようにユーザーの行動の自由の幅が広すぎると、コンテンツ制作者の意図とは合わずに体験者が視線を送っていない方向で演出されているイベントに気が付かないという問題がある。演出についても、音声により気配を感じさせることによって、ユーザーの視線方向を暗に誘導することができ、その幅を広げることができる。

VR/MRのコンテンツ制作は、通常のCGやアニメーションコンテンツの制作と異なり、実際に存在した事物の復元をするためわずかな記録や現存する事物の情報を基にして、最大限史実に近い形で仮想復元する必要がある点に難しさがある。特に日本の古代建造物は多くが木造であり、災害等で失われ現存していないことが多い。しかしながら、礎石や石敷きなど石でできた建造物の一部は残されている史跡が多い。そこで、現存する石敷きの情報を基にして簡単な操作によって自然に石敷きの編集をできる手法を開発した。このようにデジタルアーカイブの情報の欠落部分を容易に自然に復元するための編集手法は今後重要になってくるだろう。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	背景	1
1.2	目的	2
1.2.1	運用面における課題と要件	3
1.2.2	技術面における課題	5
1.3	本論文の構成	6
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>9</b>
2.1	観光客のニーズの調査	9
2.1.1	観光地を選ぶ決め手	9
2.1.2	観光旅行の目的	10
2.2	情報化のもたらす新しい観光のかたち	10
2.2.1	スマートツーリズム構想	11
2.2.2	Five Stages of Travel(Google 2012)	12
2.2.3	観光情報学	14
2.3	デジタルアーカイブのVR/MR展示の事例	16
2.3.1	古都のデジタルアーカイブ	16
2.3.2	デジタルミュージアム	19
2.3.3	先行事例と本論文で取り組む運用課題の比較	21
2.4	VR/MRの観光応用における技術課題	22
2.4.1	VR/AR/MR	22
2.4.2	視覚の複合現実感における整合性	23
2.4.3	聴覚の複合現実感における整合性	27
2.4.4	コンテンツ素材の製作技術	28
2.5	関連研究のまとめ	29
<b>第3章</b>	<b>仮想歴史体験ガイドツアーシステムの開発と運用</b>	<b>30</b>
3.1	はじめに	30
3.2	目的	31

---

3.3	関連研究	32
3.3.1	リアルタイム影付手法	32
3.3.2	人物モデルの動画からの切り抜き手法	34
3.4	VR/MR ガイドツアーシステム	35
3.4.1	ハードウェア	35
3.4.2	ソフトウェア	37
3.4.3	コンテンツ	38
3.5	VR/MR ガイドツアー	42
3.5.1	飛鳥京	42
3.5.2	明日香村	42
3.5.3	VR/MR ガイドツアーの運営について	43
3.6	実験	46
3.6.1	アンケートの内容	47
3.6.2	実験結果	47
3.6.3	考察	53
3.7	まとめ	60
<b>第4章</b>	<b>移動型MRを用いた歴史体験コンテンツと音響MRの開発</b>	<b>61</b>
4.1	はじめに	61
4.2	目的	62
4.3	関連研究	63
4.4	音響モデル	63
4.4.1	音の基本物理特性	64
4.4.2	音響的整合性の検討	67
4.4.3	音響のインパルス応答モデル	67
4.4.4	音響の計算	68
4.4.5	HRTFによる定位感の表現	69
4.5	MRサウンドシステム	69
4.5.1	ハードウェア構成	69
4.5.2	音響処理	70
4.5.3	音声信号処理	73
4.6	実証実験	74
4.6.1	実験概要	74
4.6.2	使用機器	74
4.6.3	実験設定	75
4.6.4	コンテンツ	75

---

4.6.5	実験	79
4.6.6	実験結果・考察	80
4.6.7	前年度のシステムとの比較	87
4.7	まとめ	93
<b>第5章</b>	<b>発掘情報に基づく遺跡風景の仮想復元手法</b>	<b>97</b>
5.1	はじめに	97
5.2	目的	98
5.3	関連研究	99
5.4	2次元における石敷きテクスチャの生成	101
5.4.1	ラゲールポロノイ図による分布表現	101
5.4.2	多項式陰関数表現 (IP)	103
5.4.3	IP による形状合わせ	104
5.5	実験	105
5.5.1	処理の流れ	105
5.5.2	実験結果	107
5.5.3	考察	108
5.6	まとめ	109
<b>第6章</b>	<b>考察</b>	<b>112</b>
6.1	運用面における課題に対する解決	112
6.1.1	環境を壊さない導入方法の解決案	112
6.1.2	現地における運用と移動の有効活用の解決案	113
6.1.3	コミュニケーションの促進の解決案	113
6.2	技術面における課題に対する解決	115
6.2.1	音による臨場感の向上の解決	115
6.2.2	コンテンツ制作コストの低減への道すじ	115
6.3	その他の課題	116
6.3.1	VR/MR 展示を観光に組み込むための経済システム	116
6.3.2	地域に即した文化の展示	117
6.3.3	継続的なシステムとコンテンツの更新	118
<b>第7章</b>	<b>まとめ</b>	<b>119</b>

# 目 次

1.1	本論文の構成	8
2.1	スマートツーリズム構想	11
2.2	Five Stages of Travel(Google 2012)	13
2.3	光学的整合性	26
3.1	離散化した光源からの基礎影画像の計算	33
3.2	影の合成計算	33
3.3	人物モデルの作製	34
3.4	VR/MR ガイドツアーシステムの構成	35
3.5	地図画面の操作	38
3.6	パノラマ画面の操作	38
3.7	調査記録に基づく復元例：飛鳥京苑池	40
3.8	複合現実感による演出	41
3.9	ガイドツアーのコース設定. 淡線:1日コース, 濃線:半日 コース	43
3.10	広告チラシ図案	45
3.11	MR ガイドツアーの様子	46
3.12	アンケートの集計結果	49
4.1	音の物理的性質	64
4.2	等価仮想音源による反射	65
4.3	音響のインパルス応答モデル	68
4.4	クライアント端末	70
4.5	音響処理のフロー	71
4.6	反射面の推定	72
4.7	MR モビリティシステムのハードウェア構成	74
4.8	音源マップ	76
4.9	実証実験の様子	79

---

4.10 アンケート結果 . . . . .	81
5.1 遺跡の仮想復元風景の一例 . . . . .	98
5.2 Issue of IP Fitting . . . . .	101
5.3 入力画像 . . . . .	102
5.4 3種類のポロノイ図での面積合わせの比較 . . . . .	102
5.5 フローチャート . . . . .	106
5.6 石敷き写真の透視変換 . . . . .	107
5.7 ポロノイ図の編集 . . . . .	108
5.8 (左) 石敷きの形状データ, (右) 石の分布 . . . . .	110
5.9 ケース 1: $\alpha=0.0$ , $\kappa$ (L)0.001, (R)0.01 . . . . .	111
5.10 ケース 2 : $\alpha=0.5$ , $\kappa$ (L)0.001, (R)0.01 . . . . .	111
5.11 ケース 3: $\alpha=0.8$ , $\kappa$ (L)0.001, (R)0.01 . . . . .	111
6.1 観光利用の恒常化へのサイクル . . . . .	117

# 表 目 次

3.1	ガイドツアー使用機器一覧 . . . . .	36
4.1	MR 音響システム使用機器 . . . . .	75
5.1	提案手法と先行研究の比較 . . . . .	100
5.2	3種類のポロノイ図による評価 . . . . .	103

# 第1章 はじめに

## 1.1 背景

観光の新しい形が求められている。わが国の経済を支える大きな産業の一つとして、観光業に大きな期待が集まっている。近年、アジア諸国の経済的な発展や円安傾向の為替によって、外国からの観光客は増加傾向にあり、政府統計発表 [1] にも表されているように表面的には観光業に追い風が吹いている状況にある。しかし、訪日観光客の増加は外因に拠るものであり、日本の観光業の成長に起因していないことも同時に示されている。観光統計 [2] によると中国人観光客の極端な増加に拠るものであり、滞在先は地方に比べ大都市の比重が高く、国内での主な消費行動は買い物であるなど、歪な構造が問題になっている。

観光業の継続的な発展のために、観光地としての実力を伸ばす必要がある。観光資源を擁する各地の自治体は、観光客の恒常的な増加を目指して様々な模索を続けており、観光における I T 活用はその目玉である。ホームページに記載された観光案内を参考にして、宿や施設の予約をし、交通手段を調べ手配することは、すでに社会インフラとして必須なものとなっている。従来型の I T 活用は社会インフラとして当たり前が存在するべきものとなっており、観光地の個々の特色を反映するには至らず、異なる切り口を求めて更なる模索が続いている。

一方、コンピュータの飛躍的な発展に伴い、マンマシンインターフェースとしてのバーチャルリアリティ(仮想現実感:VR[6])/ミクストリアリティ(複合現実感:MR[7])技術が実用化寸前の段階を迎えている。VR/MR 技術は、ユーザに新しい体験を提供できる道具として期待され、研究開発が進められてきた。これらの技術は実用化のターゲットとして、3C(創造, 制御, 通信)と3E(解明, 教育, 娯楽)を標榜してきた [5] もの、一般に広く普及するまでには至っていなかった。ところが2013年に安価で高性能なディスプレイデバイスが登場して以降、視聴覚に関する VR 体験が急速に注目されつつある。実用化へ向けた投資が加速しており、世界中

でいち早くアイデアをかたちにして発表しようと競争になっている。

このVR/MRを使ったデジタルアーカイブの展示は、実用化を見据えた有力なコンテンツの1つのジャンルである。美術品や工芸品などの貴重な文化財をデジタルデータ化することをデジタルアーカイビングと呼び、そのデータをデジタルアーカイブと呼ぶが、それらを存在感高く提示するためにVR/MR技術が有用である。データを展示や解析・補修に至るまで広く用いることで、実物の文化財を破損や劣化から保護することにつながる利点がある。また、空間や時間を現実と切り離れた自由な表現を用いて仮想展示することができるため、ユーザにとっても文化財をより身近にわかりやすく感じることができるようになるという利点がある。

VR/MR技術を使ったデジタルアーカイブ展示を観光のために応用しようという着想は2000年以前の比較的早期から存在したが[8]、技術レベルやコストが障害となり本格的なプロジェクトの実施例は多くなかった。近年になって漸くいくつかの企業・団体により商用化へ向けて手探りの試行が開始されたばかりである。そのため、サービス提供者がどのようなシステムやコンテンツを開発するべきかを示す指針は存在していない。VR/MRの観光応用の実例を蓄積していくことが、現在の段階においてはこの分野の発展に有用である。

## 1.2 目的

本論文は、デジタルアーカイブのVR/MR展示の観光への応用に向けて実践的な運用方法を提案し、VR技術の観光適用における課題を明らかにすることを目的とする。本論文では、次の2つの運用方式を試行する。

- (a) 既存のガイドツアーイベントのサポートツールとしてモバイル型VR/MR装置を使用する運用。
- (b) 車両型MRシステムを用いて多人数に体験を同時に提供しつつ運送を可能とする運用。

VR/MRを観光に導入する大きな目的は観光地の魅力を深めて観光客に現地に足を運んでもらうことであり、本論文では、歴史観光体験の感動の深化をVR/MR技術で実現するための要件と課題を挙げて解決に取り組んでいく。VR/MRの観光応用に関する課題は運用面における課題および技術面における課題の2つの側面がある。

### 1.2.1 運用面における課題と要件

#### 環境を壊さない導入方法

観光の現場において、新しい施設の建造のような実環境の加工はコストが高いのみではなく、景観や環境を壊してしまう恐れがある。観光地の整備は観光客の利便性を高める一方、自然な趣や歴史的な重厚感を損なってしまう危険性とトレードオフの関係にある。VR/MRを用いた史跡の仮想復元は、コストと環境負荷の低減を両立できる魅力がある。とくにMRには実際の建造物を立てることなく、往時の様子を正しい場所に再現できる利点がある。

本研究では(a)の運用提案において全周囲カメラの設置をしたことをのぞき、(a)(b)ともに環境中にマーカー等を設置することなく、あまり観光の現場に設備を設置せずに運用できるようにしている。

#### 従来のサービスを壊さない導入方法

VR/MRを用いた観光サービスやアトラクションは新しい取り組みであるので、導入に抵抗感を示すユーザーがいることが想定される。VR/MRを用いた観光サービスのユーザーは、観光客と、現在観光地の運営に関わる人たちである。従来、観光地が取り組んできたサービスを大きく変更して新しいサービスを開始しようとする、運用上の負担が大きい上に、従来の取り組みの否定のように捉えられるといった心理的な問題がある。この問題を回避してユーザーにVR/MRを用いた新しいサービスを円滑に受け入れてもらうためには、コンテンツが真に魅力的であることに加えて、従来のサービスを壊さずに導入できることが必要となるだろう。従来のサービスを壊さずに新しいサービスを導入する運用方法は、次の2つが考えられる。

- 従来のサービスを拡張する方法
- 従来のサービスが存在しないところで運用する方法

本論文中でそれぞれの方法の試行を行い、VR/MRを用いた観光サービスの導入についてユーザーの理解が得られるかを確認する。(a)において、現在観光サービスとして行われているボランティアによるガイドツアーをVR/MRを用いて拡張する事例を示す。(b)において、2つの観光史跡

を結ぶ路上において VR/MR 体験を受けられるようにすることによって、従来観光の対象ではなかった場所に観光サービスを提供する方法を示す。

### 現地における運用と移動の有効活用

博物館での VR/MR 利用は、デジタルアーカイブの魅力的な展示方法として有用である。しかし、博物館のような既存の施設における運用は展示の魅力を深めることに役に立つものの、新しい観光サービスを生み出すことには繋がらない。歴史的イベントや史跡があった現地において、VR/MR を通して歴史的な事象を詳しく提示できれば、臨場感を高めたユーザーの体験を伴う新しい展示方法を提供することができる。この歴史的な事象のおきた現地というのは屋内環境には限られない。日本の歴史的建造物は古来木造が主流であり天災などで失われていることが多いために、現在は屋外に位置する事例が多い。そのため、VR/MR を用いた観光サービスを屋内だけでなく、屋外においても運用できるようにすることが望ましい。本論文では (a)(b) の両方の事例において、屋外かつ現地での運用を行った。

また観光において、移動は、切り離すことのできない要素の一つである。移動時間は風景を眺めるなどの楽しみはあるものの、直接的な観光目的ではなく無駄時間とも捉えられる。この移動時間を、VR/MR コンテンツによって積極的に楽しむことのできる時間に変えることにより、従来の観光地の魅力を補完的に充足できるようになる。ただし、移動を伴う VR/MR コンテンツをどのようにデザインすれば観光として成立するのかは、まだ明確になっていない。筆者と所属する研究グループでは、比較的早期から VR 技術の観光応用に向けて、歴史的な出来事を題材に実践的プロジェクトに取り組んできた。その取り組みの中で開発してきた車両型 MR システムを用いて (b) の運用により実証実験を行った。とくに移動型 MR システムに残るいくつかの技術的な課題のうち、移動を伴う映像とユーザーの動作に同期した音響再現についてシステム開発を行い、試験を行った。

### コミュニケーションの促進

スマートフォンやタブレット端末などの携帯型知能機器が進化し、観光客は容易に個人で観光情報を調べて取得できるようになってきている。

VR/MR も同様に、アプリケーションによっては、ユーザーが他者や設備の助けを借りずに、所持する端末のみで疑似体験を楽しむ運用も可能である。ユーザーが一人で疑似体験を楽しむアプリケーションを制作することは容易である。観光サービスに従事する人の少ない地域における観光促進のための運用としては有用であろう。しかし、ユーザーが主体的に VR/MR アプリケーションを利用する必要があり、積極的に観光促進に貢献するものとははならない。

より面白い観光体験を観光客に提供するための仮説として、VR/MR を介して地元の人と観光客の交流の機会を増やすことが有効ではないだろうか。そこで (a) において、ボランティアガイドと観光客が一つの VR/MR 機器を利用することによって、自然なコミュニケーションが発現しやすくなる運用を試みた。

### 1.2.2 技術面における課題

#### 音による臨場感の向上

MR において、ユーザーに与えることのできる臨場感の向上は基本的な技術目標である。臨場感の言葉の定義は実際その場に身を置いているかのような感じとあり、多分に感覚的であるので定量的な定義は難しい。複合現実感における視覚的な臨場感の向上は、実空間と仮想空間との幾何学的整合性・光学的整合性・時間的整合性などの物理要素のずれの解消の問題として定義されている。MR コンテンツの動的な演出において、音は映像と同等に重要な要素である。しかし、音の複合現実感における臨場感の向上はどのような物理的要素のずれを解消すればよいのか明らかになっていない。本論文では、第 4 章において音の複合現実感実現のための検討を行い、音の整合性について定義した。ユーザーの位置姿勢とコンテンツと実空間の環境を考慮した整合性の解決のための空間音響の実時間処理方法について提案する。

#### コンテンツ編集コストの削減

また、VR コンテンツの制作コストは、普及の障害になることが予想される。コンテンツに係わる権利関係の処理をスムーズにすることもさる

事ながら、品質の高いコンテンツを安価に制作するためのツールを用意することが推進に繋がる。歴史遺物は完全な状態で残っていることは少ないが、一部分が残されていて、それを元に完全な姿が想像復元されている例が多い。歴史遺物に関しては、仮想復元の価値は絶対に現実の価値に勝ることがないため、歴史に係わる VR のコンテンツを制作する際には、現存する遺物を最大限に有効活用してリアルに近づける努力が必要である。本論文では、宮殿や庭園跡から発掘された石敷きのデジタルアーカイブから、欠損する部分の仮想修復を容易にするための編集ツールを提案する。コンテンツ制作において石敷きのような背景部分は、コストを掛けることが難しく、石敷きは人工物ではあるが工芸的な構造とは異なり自然物の特徴を多く残していてモデリングしにくい対象である。そのため、人の手による編集では、不自然な見た目になりがちであるという問題があった。そこで、実在する石の形状を種にして、形状をラスターデータから数式表現に変換し、少ないパラメータで高速で自然な形状変形によるテクスチャ生成を可能にした。

これらの取り組みを通して浮かび上がった課題を整理し、VR/MR の歴史観光への適用によるメリットと、必要とされる施策は何かを考察していく。

### 1.3 本論文の構成

本論文は、図 1.1 に示すように本章を含めて 7 章から構成される。

第 2 章では、観光における IT 活用に関連する既存の研究内容を概観し、本研究の立場を明らかにする。それを受けて、本研究の方針について概略的に述べる。

第 3 章では、仮想歴史体験ガイドツアーシステムの開発と運用について説明する。デジタルアーカイブの VR/MR 展示を観光応用した実例として、システム設計やコンテンツ制作、イベント運用まで包括的に紹介する。とくに、VR 端末を介してガイドと観光客のコミュニケーションを促進する運用が新しい試みである。

第 4 章では、VR/MR の観光応用における技術的な課題について取り組んだ例として、移動型 MR を用いた歴史体験コンテンツと音響 MR の開発について説明する。長い距離をバスに乗って移動しながら体験できる MR コンテンツを制作した。ストーリー仕立ての演出が必要となり、方向や空間の広さを知らせるための音響による演出が重要である。そのために必要な空間音響を実時間で処理するシステムを開発した。

第5章では、発掘情報に基づく遺跡風景の仮想復元手法について説明する。遺跡の復元では、発掘された情報を有効活用し、欠損した部分を自然に補間することが望ましい。VR/MRの観光応用を促進するために、コンテンツ制作コスト低減のための編集ツールは重要である。ここでは、多項式陰関数表現を用いた石敷き編集手法を提案する。

第6章では、第5章までに述べたシステムを用いて実証実験により評価した結果を考察し、VR/MRの観光応用に必要となる大局的な方針を洗い出す。

第7章では、本論文で述べている研究の内容とその成果を総括し、残された今後の研究課題についても述べる。

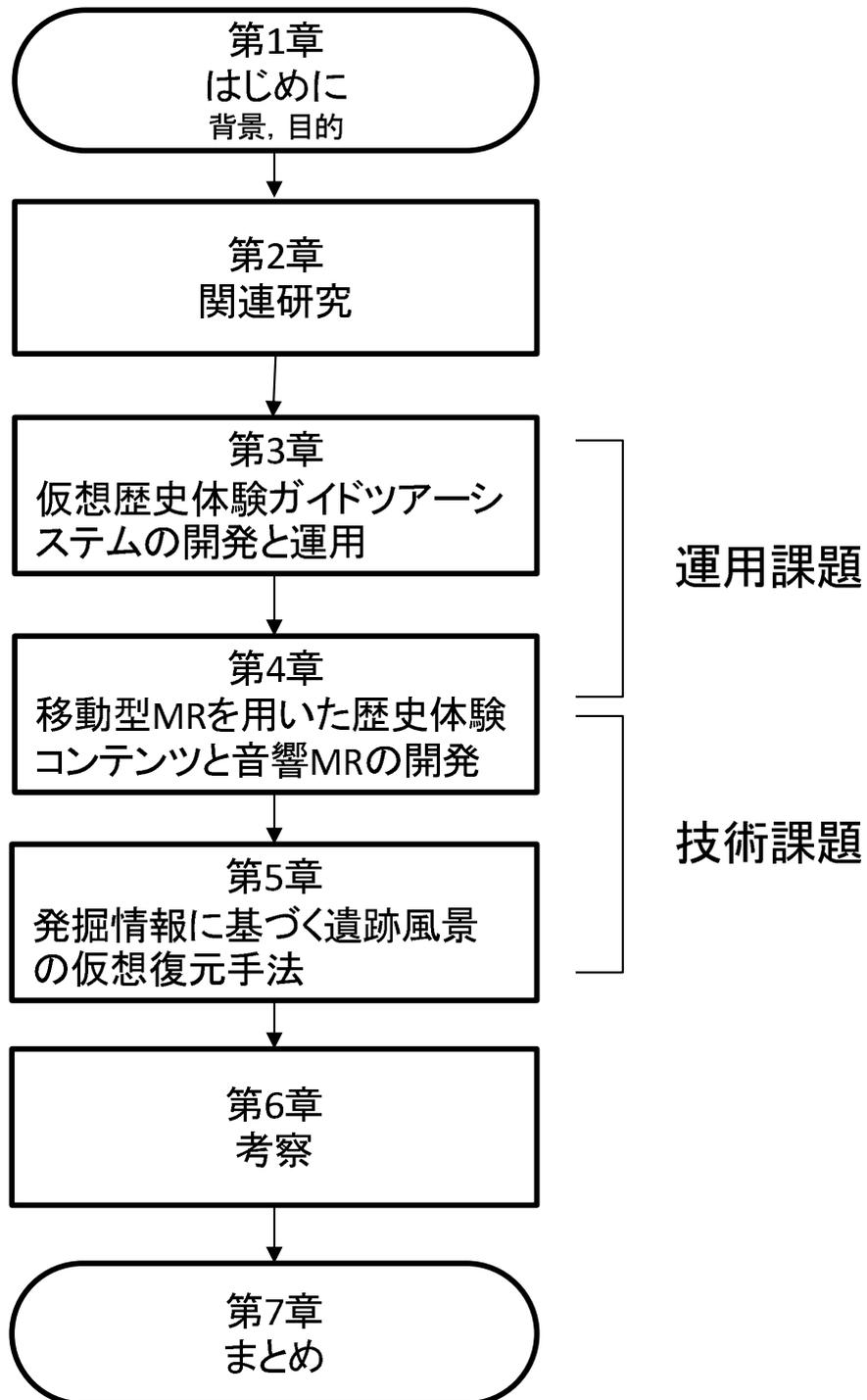


図 1.1: 本論文の構成

## 第2章 関連研究

本章では、観光のIT活用に関する先行研究や事例を、大局的な観点から微視的な視点へ変えつつ眺めていく。

### 2.1 観光客のニーズの調査

観光に関する意識・実態調査報告書 [3] に、国内観光地を選ぶ決め手や観光旅行の目的に関するアンケート調査の結果が示されている。年1回以上国内旅行をする400人に聞いた「旅行」に関する調査 [4] にも、2014年度における旅行目的の調査が記載されている。

#### 2.1.1 観光地を選ぶ決め手

報告書 [3] では、複数回答可能なアンケートにおいて、国内観光地を選ぶ決め手は「自然の豊かさ」(58%)、「歴史・文化」(50%)、「観光地およびそこまでのインフラ(国内交通ネットワーク)の充実(45%)」、「宿泊施設」(45%)、「食事の魅力」(44%)、「温泉施設」(42%)の順となっている。歴史・文化は2番目の関心の高さを示している。さらに世代別の歴史・文化に対する関心を調べてみると、29歳以下(40%)、30歳代(37%)、40歳代(41%)、50歳代(54%)、60歳以上(63%)となっており、若年層よりも高年齢層の方が高い。一方で、インターネットによる観光情報の収集の利用率は若年層の方が高く、IT技術への関心は若年層の方が高めの傾向が推測される。

WEBアンケート [4] における国内旅行の目的は、「自然観光・景観・観光」(58%)、「温泉」(50%)、「食べ歩き・グルメ」(45%)、「名所・旧跡観光」(41%)、「都市観光」(40%)の順になっており、「名所・旧跡観光」は [3] に比べて順位が下がっているものの高い値を示している。

VR/MR技術の応用により歴史・文化の観光コンテンツの拡充を図る

ことは、観光客の要求に適合している。また、VR/MR 技術への関心によって若年層の興味を集めることができれば、歴史・文化観光の世代バランスの平準化を望むことができる。

### 2.1.2 観光旅行の目的

同報告書 [3] では、同様に複数回答可能なアンケートにおいて、観光旅行の目的は「娯楽、ストレス解消、リフレッシュ」(90%)、「体験、異文化に触れる」(69%)、「自己啓発、学習」(26%)の順となっている。とくにニューツーリズムと呼ばれる体験型観光が2007年ごろから関心を集めている。ニューツーリズムは、従来の名所・史跡見物的な観光に対して、テーマ性が強く、体験的要素を取り入れた新しいタイプの観光と定義され、「産業観光」「エコツーリズム」「ヘルスツーリズム」「グリーンツーリズム」「エンタメ観光」などの例がある。

VR/MR 技術による仮想歴史体験は、従来の名所・史跡見物的な観光に体験的要素を加えることができ、新しいタイプのニューツーリズムの一つとして訴求できる魅力がある。

## 2.2 情報化のもたらす新しい観光のかたち

観光における VR/MR 活用の位置づけを、観光の大局的な概念モデルにより確認したい。

観光の言葉の定義は一つに定まらず、「楽しみを目的とする旅行」や、「他国・他郷の風光・景色を見物すること」とされている。観光は無形概念であり、時代とともに変遷するので厳密な定義は困難であるが、観光の構成要素を考えることで定義しようという試みは常時継続的になされている [13]。英語のツーリズムという言葉には厳密な定義<sup>1</sup>が与えられていて、日本語の観光という言葉の定義とは違うとされているが、本質には影響しないのでここでは深く追及しない。

重要なことは、観光の定義は曖昧なので、立場によって見方が異なり、かたちが変わり得るという点である。観光の情報化について、メタ構造

---

<sup>1</sup>ツーリズムとは、継続して1年を超えない範囲で、レジャーやビジネスあるいはその他の目的で、日常の生活圏の外に旅行したり、また滞在したりする人々の活動を指し、訪問地で報酬を得る活動を行うことと関連しない諸活動 [13]



図 2.1: スマートツアーリズム構想

をモデル化して目指すべき新しい観光のかたちの提案がされている。そのいくつかを紹介する。

### 2.2.1 スマートツアーリズム構想

池内・大石ら [21][22] は、観光が動機づけ・学習・訪問・感動・再訪のサイクルの循環 (図 2.1) で成り立つと仮定し、それぞれの段階における IT を用いたサポートが観光の活性化につながると主張し、スマートツアーリズム構想として発表した。各段階で、情報提供、移動支援、位置連動情報コミュニケーションをサポートするようなツールを提供することが、観光行動の循環を作り出すことに繋がるとし、IT 化の提案は次のようにされた。

**動機づけ** 潜在的な観光客に、WEB サイトなどを通じて遠方の観光地の魅力やブランドを閲覧できるよう情報提供する。

**学習** 博物館や資料館での文化財鑑賞・研究成果の展示・シアターでの映像鑑賞を、デジタル技術でサポートし理解向上を促す。

**訪問** 移動を一つの楽しみと捉え、移動時間を無駄時間とせず、移動に伴うコンテンツを提供する。

**感動** 地域特有の情緒や雰囲気を楽しみながら、観光客の興味や知識レベルに応じたインタラクティブなコンテンツを体験できるようにする。

**再訪** コンテンツと地理情報に関連付けてユーザの体験を共有できるサービスを提供し、「現地に行かなければ体験できない」情報を共有発信できるようにする。

これらのサービスの中心にはデジタルアーカイブが位置し、デジタルアーカイブの商用的な利活用を目指しているという側面もある。

この構想の下、2006年ごろから現在まで実践的な実験が行われており、特にバーチャル飛鳥京プロジェクトと呼ばれる取り組みの中で、VR/MRやデジタルアーカイビングに係わる様々な技術的な課題と解決手法が示されてきた。

最も代表的な成果は、MR装置を屋外で運用するときの諸問題の解決であった。コンピュータの中で世界が完結するVRと異なり、MRは実世界の風景を借景して自然な形でCG合成を行うことで成り立つ技術である。そのためには、実世界と仮想世界を自然に合成するために整合をとる必要があり、幾何学的整合性・時間的整合性・光学的整合性と呼ばれる課題として知られている。技術的な課題の詳細については後述するが、本プロジェクトではVR/MR体験の感動を深めるために品質の高さが大事であり、技術的課題を一つ一つ解決していくことが重要であることが示された。

### 2.2.2 Five Stages of Travel(Google 2012)

Googleは旅行マーケティングにおいて各々の旅行者を顧客としてターゲットにするために、Dreaming・Planning・Booking・Experiencing・Shareingの5つの段階において、異なるオンラインマーケティング戦術をとることが重要であると発表した[29](図2.2)。観光がサイクルの構造を持つという提案は、スマートツーリズム構想と類似しているが、立場の違いから各要素の中身は大きく異なる。サービス提供者側からの視点で戦術目的を明確にすることで、商業的な効率を向上することを目的としており、要旨は次のとおりである。



図 2.2: Five Stages of Travel(Google 2012)

**Dreaming** 潜在的な顧客の内なる考えに共感するようなメッセージを発信し、自分の夢を行動に移す欲望が発するよう種を植え付ける。

**Planning** 顧客は信頼できるサービスを望んでいる。そのため、多くの顧客によるポジティブなフィードバック情報がオンラインにあることが信頼に繋がるので、オンライン上の情報管理に留意する。

**Booking** 計画を契約につなげるために、予約プロセスは可能な限り単純化するべきである。

**Experiencing** 顧客の当初の夢に適合するサービスを確実に提供する。

**Shareing** 旅から帰った顧客は誰かに彼らの経験を分かち合いたい願望を持っている。もう一度マーケティングプロセスを始める促進剤とするために、共有のために必要な場所を与えるべきである。

Googleは検索エンジンをはじめ、地図・ソーシャルネットワークサービス・画像動画共有サービス・スマートフォンOSを包括的に保有しており、暗黙のうちに人々の行動をコントロールするために、非常にシビアな分析に基づいて自社のクラウドサービスが提供していることを垣間見ることができる。

また同社は、VRを一般に広く浸透させるために、スマートフォンを利用して専用のデバイスを必要としない安価な簡易VRゴーグル「Google Cardboard」[30]の販売を開始した。VR用パノラマ写真をスマートフォンで撮影できる無料アプリを提供し、ユーザが自分自身で容易にVRコンテンツを作れることを可能にしている。また、Project Tango[31]と呼ばれる手軽なモバイル3次元計測デバイスを開発する計画も進められており、ナチュラルインターフェースや3次元デジタルアーカイビングの大衆化を後押ししている。これらは現在は技術的な研究開発の段階にあるが、今後、ShareingとDreamingに強く訴えかける戦略上の武器になるだろうと予想させられる。

位置情報連動型ゲームingressもgoogleから生まれた。人々を屋内のコンピュータの前から屋外へ連れ出すことを目的に開発され、観光ビジネスをターゲットとして開発されたものではなかったが、同社が保有する全世界を対象とした地図サービスと連携し、結果的に世界中で多くの人々を動員するアプリケーションとなった。決められた地点まで実際に赴くことが必要となるルールが定められているため、その過程で間接的に行われた経済活動の大きさは計り知れない。

また、2014年、米大手SNS企業のFacebook社はHMDメーカーであるOculus社を買収し、「ゲームの後、Oculusをその他多くのエクスペリエンスのためのプラットフォームにしていく」[32]と表明している。Facebook社がソーシャルネットワークサービスを主な事業としていることを考えれば、そのターゲットの一つとして観光が標的とされていることは想像に易しい。

このように大手IT企業は、非常に大きな規模で戦略的に観光業のITサービス化を進めている。

### 2.2.3 観光情報学

観光を総合的な学問とする観光学の歴史は古い。その中で観光を情報の観点から捉える新しい学問として観光情報学[33]が生まれている。観光情報学が関連する研究領域は、モバイルコンピューティング・ユビキタスコンピューティング・エンタテインメントコンピューティング・自然言語処理・オントロジー工学・スマートシティ・サービス学・人工知能など広範にまたがり、各分野を専門とする研究者が大小さまざまな切り口で参加している。位置情報サービス・拡張現実(AR)・デジタルアーカイブ・

デザイン・ユーザー参加による情報構築・パーソナライゼーション・ゲーミフィケーション・マーケティングなどの情報化により、観光の質を上げる新しい観光システムを発明することを目的としている。

新しい学問分野であることと、観光が多くの要素の複雑に絡み合った産業であると概観する立場であるために、まだ様々な模索の中から糸口を掴もうとしている段階にあり、学問として進むべき道が明確にはなっていない。ユーザーの観光行動を暗にコントロールしようという目的が明確な Google の施策に対して、各要素の情報化による質の向上に主眼が置かれているように思われる。金銭的な問題についてはあまり議論の対象とされていない。直接的に金銭の流れを観測できるクラウドサービスを擁する Google をはじめとする大手 IT サービスに比べて、人の行動に金銭の動きが伴うと推測できるとはいうものの、観光の定量的な評価手段を持たないところが課題であろう。

AR や VR の観光応用については、古都の復元・古代の生物の CG 復元のように時間を超越する表現や、異なる季節や夜間にライトアップする時間をずらした表現のように目の風景と仮想風景の共通点や違いを見出すことが楽しみを提供するものとしている。ゲームや漫画のキャラクターを CG で登場させる聖地巡礼と言われるような、作品の舞台を訪れる観光に AR 適用が有効であると見ている。現実の世界をゲームの舞台に変えて楽しむシューティングゲームやキャラ探しゲームなどを、AR を利用した新しい楽しみを提供するものとして紹介している。

AR/VR の観光応用の課題として、魅力的なコンテンツの制作が重要であるが、制作の手間や費用を誰がどのように負担するのかが課題であるとしている。また、著作権や肖像権といった権利処理のハードルが低いことが問題であり、地域との関連性の希薄なものの導入は慎重に行う必要があるとしている。技術的にはスマートフォンなどのモバイル端末が AR を利用する機器の主役となると考えられるので、視認性やバッテリー性能などハードウェアの屋外使用における課題のほか、「歩きスマホ」などの危険性が社会問題にならないよう配慮しなければならないとしている。

学問としての体系化の過程において、大小さまざまな課題が洗い出されている点が重要であろう。

## 2.3 デジタルアーカイブのVR/MR展示の事例

VR/MRの観光応用は、多くの利用者から注目されるコンテンツとして有望視されている。その取り組みは地域ごとに行われている事例が多く、それぞれに特色がある。ここではいくつかの事例を紹介していく。

### 2.3.1 古都のデジタルアーカイブ

有形・無形の文化財をデジタル化したデータをデジタルアーカイブと呼ぶ。街並みのデジタルアーカイブを制作し展示することは、2001年ごろから現在まで学術分野において人気のテーマである。古都の再現事例を表2.3.1に整理する。主目的がデジタルアーカイビングにあるかVR/MR展示にあるかの違いはあるが、取り組みを通して大小さまざまな課題の解決が試まれてきた。

#### バーチャル飛鳥京

バーチャル飛鳥京は、2006年ごろから続けられている東京大学・明日香村・国土交通省近畿地方整備局国営飛鳥歴史公園事務所の合同プロジェクトであり、飛鳥地方における歴史的風土及び文化財の保存・活用を図りながら歴史体験ができる手法の一つとして取り組まれた[58]。CGで復元された古代飛鳥の遺跡を現在の風景に重ね合わせて、往時を疑似体験できる。長期間にわたる施行実験では、現地でVR体験できることにより遺跡の大きさや周囲との位置関係を理解しやすいことが評価された。とくに若者層や飛鳥地方に初めて来訪した参加者の好評を得られ、従来の歴史ファン以外の客層を呼び込むことが期待された。遺跡がある現地において、屋外でVR/MR体験できる点に特徴がある。

分野	名称	分類	規模
学術	バーチャル飛鳥京	VR/MR展示	大
学術	バーチャル京都	デジタルアーカイビング	大
学術/商用	平城宮跡	VR/MR展示	中
学術	藤原京CG再現	デジタルアーカイビング	小
商用	長岡京	AR/MR展示	小

高松塚古墳や甘樫丘展望台における VR 展示イベントをはじめ、伝飛鳥板蓋宮と飛鳥寺を結ぶルートバスツアーや、川原寺・水落遺跡・甘樫丘東麓遺跡などの仮想復元などが取り組まれた。バスツアーについては、本論文で詳説する。明日香村は、レンタル EV サービスにタブレット端末による観光ガイドを取り入れ、道案内をはじめ観光案内や仮想復元を簡易的に楽しめるようにしている。また、あすかナビというスマホアプリを明日香村が村長の主導によって制作し、観光客に広く地域のアピールを行った。

### バーチャル京都

京都は、平安期から現代まで日本の主要都市の一つとして栄える町である。立命館大学の矢野ら [23] は 2002–08 年ごろまで文部科学省 COE・GCOE の支援を受けて、バーチャル京都プロジェクトと呼ばれる総合的なデジタルアーカイビングプロジェクトを推進してきた。日本の歴史都市京都の時・空間をバーチャルに自由自在に動きまわることのできる 4 次元 GIS 京都バーチャル時・空間を構築することを目的としている。現代の京都の街並みのデジタルアーカイビングをはじめとして、古地図・古写真・古絵図を、地理情報と関連付けて収集管理することで、昭和期、大正・明治期、江戸期、平安期の地形や街並みを仮想復元している。完成した 3D 地図の応用としてハザードマップを制作し、人と文化財を災害から守るために役立てている [25]。

また、京都の祭事や芸能文化のような無形文化財の記録再現にも挑戦し、五山送り火、祇園祭、南座、能、歌舞伎などのデジタル化にも取り組んだ。崔ら [61] は、無形文化財である京都祇園祭の山鉾巡行のバーチャル再現をデジタルアーカイブを用いて試みた。動的な情報の保存のために、モーションキャプチャや立体音響録音、質感取得など多岐にわたる技術を開発し、現実感高く再現できる装置を開発している。

### 藤原京 CG 再現プロジェクト

奈良県橿原市と奈良産業大学は、2007 年から 3 年間に掛けて藤原京の CAD モデルを製作し、風景や儀式の様子を CG 再現した [18][19]。完成した CG は、「飛鳥・藤原の宮都とその関連資産群」の世界遺産登録のための PR や地域活性化のために活用されている。

### なら平城京歴史ぶらり

奈良県は、ATR Creative の開発した観光情報を付加できる地図アプリ「ちずぶらり」を用いて、なら平城京歴史ぶらりというスマートホンやタブレット端末向けアプリをリリースした [26]。平城宮跡を周遊する際に 1300 年前の平城京の情報を閲覧し、歴史ストーリー (音声ガイド・マンガ) や再現 CG ムービーなどを楽しむことができる。奈良時代俯瞰図・現代地図・現代航空地図古地図を切り替えて表示することができ、お勧めの観光ルートを知ることができる。地図上の見どころの位置にはランドマーク情報が配置されボタン操作によって、音声再生・人物紹介・人物相関図・パノラマ・動画などのコンテンツを閲覧することができる。

また、ATR Creative はちずぶらりを用いて、日本各地の観光ガイドアプリをリリースしている。歴史観光用の「なら飛鳥京歴史ぶらり」「タイムトリップビュー日本橋」「タイムトリップビュー江戸城門」の他に、動物園ガイドやマラソンガイドなど、およそ 50 のコンテンツが用意され、無料もしくは有料のアプリとして提供されている。江戸、奈良、大垣、名古屋、鯖江、サンフランシスコ、小布施、高遠、大阪、横浜、伏見、神保町、川崎、伊勢、伊賀、四日市、三重、神戸、相模原、桜井、高知、鳥取などの街ガイドが作られている。同アプリはシンプルでコンテンツ制作が安価かつ容易にできることに特徴がある。

また別の研究として同地において、天目ら [60] は、ユーザの位置姿勢に応じて現実世界に重畳表示する情報注釈システムを、ウェアラブル MR 機器を用いて実装し、平城宮跡における観光案内情報を提示する試験を行った。

大石ら [78] は、平城遷都 1300 年祭において、平城宮跡が広い公園として整備されていることを利用して、電動トラムに乗車して移動しながらストーリー仕立ての VR コンテンツを楽しむことのできるイベントを実施した。

### AR 長岡京

かつて長岡京があったとされる京都府向日市は、長岡宮の史跡で仮想復元された当時の都の様子をパノラマ画像で鑑賞することのできる AR 長岡宮アプリを 2014 年にリリース [27] した。アプリ開発は近隣のゲーム会社である (株) ジーンが行い、2015 年には HMD を用いた現地体験会も開かれている。同アプリは現地を訪れないと AR や VR のパノラマ風景を

眺めることができないという特徴があり、特定の日時に現地を訪れると特別な画面を見ることができるなどのゲーム性が付与されている。同社は他に、AR 難波宮や歴なび多賀城など現地を訪れることで使うことのできる AR アプリの開発も手掛けている。

また、バーチャル京都に関わった立命館大学の研究グループが同様のコンセプトでデジタルアーカイブを制作している [28]。

### 2.3.2 デジタルミュージアム

デジタルアーカイブと VR 技術による仮想展示を用いた博物館・美術館を、デジタルミュージアム [9][10] という。考古学分野の文化財研究の研究成果は、一般に知られているイメージよりも深く広く掘り下げられていて専門知識が無ければ難解である。これを理解しやすくするために、仮想展示・修復や多言語対応・強調表示などにデジタル技術が使われる。VR シアターと呼ばれる映画館型のデジタルミュージアムは、すでにいくつかの運用例が報告されている [11][12]。とくに凸版印刷 [62] は、文化遺産のデジタルアーカイブを事業として長年行ってきており、そのデータの商用活用として VR シアターを運営し、旅行会社のツアーの一部として VR コンテンツ鑑賞を組み込んだ。MR 技術をデジタルアーカイブの展示に用いる提案は、屋内のデジタルミュージアム [14] のみならず、システムを屋外に持ち出して自然景観を含んだ大規模な展示に用いる提案がされている [15]。このような歴史的な経緯を受けて、VR/MR 技術を用いたデジタルミュージアムが観光に融合するよう発展するのは自然な流れと言っている。

#### 円明園の VR 復元

北京理工大学の王ら [51][50] は、2006 年頃から中国北京市にある世界遺産登録された遺跡である円明園を仮想復元する試みを進めてきた。円明園は、かつて清王朝の離宮の一つであり近代西洋風の建物が立ち並ぶ豪華な庭園であったが、1856 年のアロー戦争の際にフランス・イギリス連合軍に徹底的に破壊され、長年荒廃したまま放置されてきた。近年、公園整備されて観光地として一般に開放されたが、破壊された建造物は瓦礫のまま残されている。巨額の投資による再建が検討されているが、歴史的な経緯を考慮して破壊された姿を保存した方がよいとの意見もあり、

当地における再建は行われていない。王らは、現存している資料を元に当時の姿を 3DCAD で再現し、現在の円明園の風景の上に重ね合わせて表示して、観光地で望遠鏡をのぞくような感覚で体験できる MR 装置を開発した。装置は現地に常設されて観光客が体験できるようにされている。数少ない屋外での商用 MR 展示の初期事例である。

### ユーザー参加型

またユーザー参加型のミュージアム体験の試みが多くなされている。高田ら [41] は、ユーザーの空間認知のパターンをカテゴライズし、認知されやすい地図のパターンを選択して提示するナビゲーションシステムを開発した。伊藤ら [42] は、ミュージアムにおける鑑賞体験記録と感想共有を組み合わせた館内ツアー支援システム CoPlet を提案し、ログデータの解析からシステムの特性を評価した。徳久ら [43] は、ミュージアムシアターにおける VR 作品の上演結果をもとに、ミュージアム体験のデザインについての改善案を調査した。柴田ら [45] は、モバイル向け MR のアプリケーションの開発を容易にする仕組みが重要だとして、機能分散型フレームワークを開発した。主眼は (1) 複数のモバイル機器で同期共有可能であること、(2) モバイル機器の種類や性能差を吸収すること、(3) アプリケーション開発を容易にすることに置かれた。岡本ら [57] は、インターネットを介して 3次元デジタルデータに関連付けてメタ情報を付加・閲覧できる情報共有システムを開発した。

多くのシステムが試験されているが、大勢が使用する規模のシステムにまでは成長していない。

### 簡易パノラマ VR 体験

低コストで商用利用される VR パノラマが数多く発表されており、VR を用いたまちづくりが模索されている。北海道の美唄市は、市内の名所をパノラマ撮影してインターネットで配信し、スマートフォンやタブレットで鑑賞できるようにした。長野県は楽天トラベルと組んで同様のサービスを提供している。カンタス航空は、航空機のファーストクラス向けに渡航先の観光地を先行体験できるように、Samsung 製 HMD を用いたパノラマ展示サービスを提供している。

### 2.3.3 先行事例と本論文で取り組む運用課題の比較

VR/MR の観光応用のための運用課題が数多く残っていることを挙げたが、先行事例の中でどのように取り扱われてきたかを見ていきたい。本論文で解決に取り組む運用課題を再掲すると、環境を壊さない導入方法、従来のサービスを壊さない導入方法、現地における運用、コミュニケーションの促進、移動の有効活用であると記した。

環境を壊さない導入方法は、常設の設備を必要としないシステムによって実現される。持ち運ぶことのできる計算機や装置を用いてシステムを構成できることが望ましく、位置や方向合わせのために環境中にマーカーの設置を必要としないことが望ましい。そのため、デジタルミュージアムで用いられるようなシアター型や、環境中に特設されたマーカー形式を認識に用いる一部の AR/VR 携帯アプリは、最適な運用形式とは言えない。

従来のサービスを壊さない導入方法は、既存のサービスを提供する人々の取り組みを壊さないことにより実現される。個々の観光現場の事情によるものの、やはりシアターや固定型 VR 体験装置のように新しい施設を作り人の流れを変えてしまうような形式は望ましくない。また、現地における運用の課題と合わせて、ユーザーが現地の人と交わることなく、自前の携帯端末と専用アプリなどで一人で体験して帰ってしまうような方式も観光の促進には繋がらないため避けるべきである。さらに、現地を訪れることなく史跡を自宅や遠隔地などで仮想体験できるようにすることも、一定の宣伝効果は見込まれるものの現地に足を運んでもらうという観光促進の目的に即さないため、限定的に提供されるべきである。現地を訪れて VR/MR 体験をすることで最大の楽しみが引き出されるようにコンテンツの工夫がされることが望ましい。

コミュニケーションの促進の課題については、IT 機器の利便性が向上するのに比例して没交渉となりがちであることに抵抗するため、意識的に取り組む必要がある。VR/MR に限らず観光促進策は、観光地に根付いて生活する人たちの受益につながらなければならない。単に他所の地域の人に来て現地で消費活動をせず帰っていくような単なる移動の形態にしてはならない。そのため、VR/MR 体験を携帯アプリ等で簡易的に提供することは、観光促進のためには限定的な効果しか見込むことができない。観光地に導入すべき VR/MR サービスは本格的な物にするべきであり、現地でのみ提供される特別なものとする方が良い。

移動の有効活用の課題は、現地における観光行動の無駄な時間を減ら

して観光体験の充実をはかるために有効である。とくに現地の広い地域において特別感を提供することができる点が、現地を訪れる動機を呼び起こすために重要である。先行研究や事例において、広域を移動しながらMR体験できるものはほとんど存在していない。本研究において、その観光促進への効果を調査する。

## 2.4 VR/MRの観光応用における技術課題

### 2.4.1 VR/AR/MR

VR/MRの観光応用は、多くの基盤技術に支えられている。ここでは広範な意味でのVRやMRを含め、その主たるものを整理する。

仮想現実感 (Virtual Reality; VR)・拡張現実感 (Augmented Reality; AR[49])・複合現実感 (Mixed Reality; MR)は、コンピュータの援助により、コンピュータの中に仮想的に作られたモデルを用いて3次元的な視聴覚体験を提供することを目的とした技術である。これらは類似の概念であるが、実空間と仮想空間の関連性についての違いがある。

本論文中の用語として、区別のために定義を概説する。VRは完全に機械やコンピュータの中に作られたモデルを対象とし、現実感のある人工的な空間を体感する技術の総称である。主に一人称視点で仮想空間に没入する感覚を提供する。ARは現実世界の大まかな位置情報に合わせてモデルを表現する手法であり、実空間に関係づけてデジタル情報を付加して、実空間における活動を支援する技術のことである。MRはそれらを含みARより厳密に現実世界と仮想モデルを物理的な誤差を少なくスムーズにつながるように表現する手法である。

Mixed Realityは文献[20]において、1994年にトロント大学のPaul Milgramが提案した概念であり、それまでに存在したVR・ARの概念を包括して、実空間と仮想空間の相対的な位置合わせや時間の同期などの整合性を高く融合することによって、実空間を情報で拡張する技術とされている。定義は人によって若干の曖昧性があり、ARとMRは同義として扱われることもある。今後、更なる技術の発展によってMRが一般化するかたちで、これらの概念の境界は更に曖昧なものになっていくだろう。

これら技術は、視覚・聴覚・体性感覚・前提感覚・味覚・嗅覚など人の感覚を拡張することを目的とするが、デジタル技術による扱いやすさから視覚・聴覚を中心に発達してきた。一般的な処理の流れは、センサー

を用いて実世界のモデル化を行い，仮想世界のモデルと計算機内で合成処理を行い，人の感覚に影響を与える提示装置により出力するという段階で構成される．視覚の場合，一般にカメラとコンピュータ，ディスプレイが装置として用いられ，カメラ入力画像をもとに視覚情報処理により位置姿勢や光源情報の取得を行い，それらの情報を反映したCADモデルのレンダリングを行い，カメラの取得画像と合成してディスプレイに表示される．聴覚の場合，カメラがマイクに代わりディスプレイがスピーカーやヘッドホンになり，音源に環境や演出・ユーザーの動作に応じた音響効果を加えて出力する．

また，仮想世界と現実世界の整合性を取ることは逆に，時間や距離など現実世界では制御し得ない物理パラメータを超越して表現する手段としても，VR/MRの技術は使用される．例えば，ある地点で起きた出来事を記録または再現モデルを生成し，後日同じ場所で再生することで，過去にタイムトリップしたような感覚を与えることができる．あるいは，ある一つのコンテンツを複数のユーザが別々に体験して，そのコンテンツの時間軸上で行動履歴や感想を残すことができるようにして重畳再生することによって，時間や場所を超えて同時体験しているような感覚を与えることができる．これらの特性を利用して，様々なアプリケーションが提案されている．

## 2.4.2 視覚の複合現実感における整合性

MRの視覚に関する臨場感向上に係わる研究は多岐に渡り，事例も多いためここで全てを取り上げることは不可能であるが，技術課題の概要を掴むために関連した研究をいくつか紹介する．MR研究は，整合性の向上に主眼が置かれている．

### 幾何学的整合性

幾何学的整合性を合わせるための手法は，視覚的な位置合わせの課題であり，

- GPSやジャイロコンパス等を用いるセンサーベース手法
- 予め表示対象の近くにバーコードのようなマークを張り付けておくマーカーベース手法

- カメラ画像中の特徴点の動きからカメラの位置姿勢を逆推定するトラックベース手法
- 事前に位置合わせ対象の物体の3次元CADモデルや特徴点データベースを取得しておきモデルとカメラ画像とのマッチングを行うことで視点位置の推定を行うモデルベース手法

が知られている。

観光を前提とする場合、屋外利用において特殊な装置を用いたり、実環境に物理的な加工を加えることは、風景に違和感を与えたり高コスト化の原因となるため極力避けるべきである。そのため、将来的にはスマートフォンやタブレット端末に搭載されているような一般的なセンサーのみを使用した位置合わせ手法の使用が望ましく、画像処理を主とした手法の開発が急がれている。しかしながら、計算量の増加による電力消費の増加や、光源変化に対する対応などにまだ課題が多い。

一例として、稲葉ら [56] は、屋外で時々刻々日照条件の変化する環境下において、特殊な装置を使わずに、カメラ画像と幾何モデルを精度よく重畳して表示するために、光源変化に頑健な画像処理に基づく位置合わせ手法を開発した。屋外環境では日照条件により陰影が変わる。カメラで観測した画像の色彩が大きく変化する為、この影響をキャンセルするために次の段階で処理が行われる。位置合わせ対象の物体モデルとして、3次元形状モデルと物体の表面反射率(アルベド)で表現された色彩モデルを事前に保持しておく。実行時に天空の輝度分布を推定し天空の光源分布モデルを随時作成して、現在の光源条件に合わせた見え画像をレンダリングして生成する。太陽光のスペクトル分布は一定で安定しているので、表面反射率と推定した光源の積によって安定した色彩の再現ができる。レンダリング結果の中の物体モデルは、カメラで撮影した対象物体と似た見えとなっているので、特徴点抽出による位置合わせによってこれらの間の幾何学的なずれを推定することができる。

### 光学的整合性

光学的整合性は、実世界の光源環境に合わせてCGモデルを表示するという課題である。大別して、画像に基づくレンダリング手法(Image Based Rendering; IBR)とモデルに基づくレンダリング手法(Model Based Rendering; MBR)が知られている。IBRはサンプリング画像に基づく方法であり、あらかじめ計測された多数の画像から実環境の条件に合う一

枚の見え画像を生成するものである。MBRは理想的には光学シミュレーションを行うことと同義であり、

- 光源推定
- 反射成分の分離
- 形状モデリング
- 影付け
- 大気の散乱
- 人間の心理学的視覚機能に基づく視認性調整

など、複数の要素にまたがった課題である。

池内ら [104] は、複合現実感における光学的整合性のための基盤技術を示した。MBRのためのパラメータを取得するために、幾何形状推定・反射成分の分離・反射係数の推定手法を提案した。プロジェクターとカメラを用いた3次元計測システムを用いて距離画像を測定し、複数の方向から計測した距離画像を統合することで物体表面の3次元モデルを生成して、物体表面各点における表面法線方向を得られるようにした。物体の反射光は、物体の表面ですぐに反射する表面反射成分と、物体の内部に入り込んで様々な方向へ散乱してから物体外へ出てくる内部反射成分の和で表すことができるとするモデルが提案されており、2色性反射モデルと呼ばれる。この2つのパラメータを分離して保持することで、仮想的に光源環境を変化させたレンダリングが可能になる。表面反射成分は、光源と物体表面の法線方向のなす角度と同じ角度で反射するのに対して、内部反射成分は内部で様々な方向に反射し散乱した状態であるので視線方向による変化は無い。2色性反射モデルによると観察される反射光の変化は、表面反射成分の強さと内部反射成分の強さからなるパラメータと、表面反射成分の色ベクトルと内部反射成分の色ベクトルのパラメータの積で表されるとされる。すでに物体表面の法線方向は既知であるので、多くの方向から観察した画像列を入力とした連立方程式を立てることによって、観測方向と光源方向に応じて明るさと色を分離できる。さらに観測方向と光源方向に応じた反射成分の強度変化を近似反射モデルに当てはめることによって、内部反射の反射係数（アルベド）を推定した。

このように取得した物体の光学モデルを用いて、実場面への仮想物体の合成方法を示した（図 2.3）。先に取得した光学パラメータを用いて物



図 2.3: 光学的整合性

体をレンダリングすることに加えて、魚眼カメラを用いて現実空間の光源環境を直接取得し、仮想物体形状をもとにソフトシャドウを計算した。レンダリングされる影の強度は、各方向からの光源が作る影の線形和であらわされる。これを基に既知の形状を利用して、逆に影から光源を推定する方法も示された。自然な影付けの計算手法としてレイトレーシング法が知られていたが、計算時間が非常に長いという問題があった。簡単な光学モデルを用いて、実用的な時間で計算可能な合成方法が示された点において功績が大きい。この結果として、光学的整合性のとれたレンダリング結果が得られることが示された。

Fukiageら [53] は、人間の心理学的視覚機能に基づく視認性調整手法を提案した。実風景に仮想物体を重畳表示するとき、CGと現実物体の奥行位置が重なって現実物体の方が手前に位置して遮蔽関係が生じる際、CGから前景部分の輪郭部分を切り抜いて表示しないという処理が必要になる。しかし、樹木や茂みのように複雑な形状の場合、実行時に実時間で形状を推定し正確に切り抜くことは難しい。これを回避するためにはCGを半透明にすることによって前景の情報を必要としないブレンディングが有効である。ただし、前景と透明物体の単純な加算では、人の透明視覚特性が線形ではないために前景にCGが溶け込んで見えてしまうという問題があった。そこで、知覚特性に対して線形になるよう混合比に調整を加えたブレンディング手法を提案している。

Moralesら [52] は、大気の濁りの推定とレンダリング手法を提案し、遠方にある物体が大気に霞む様子を再現できるようにした。広域都市の遠景をレンダリングする際に有効である。

### 時間的整合性

実世界もしくは仮想世界のどちらか、もしくは両方に動きのある対象に意図的な動きの演出を重ねて提示したい場合、時間を同期する必要がある。時間は物理的に遡上できないため、時間的整合性を合わせるためには、すべての処理を実時間で行う必要があるという拘束条件として課されることになる。実時間とは、人間の感覚として認識されない程度の短い一定時間である。例えば、視覚では実用的には100ms程度のことであるが、短ければ短いほど良いとされる。通常、センサーの計測時間と計算機による計算時間、および出力デバイスの出力時間の合算である。

一般に計算時間の短さと電力量は反比例の関係にある。屋外使用のためのモバイル型計算機ではバッテリー容量に制限されて計算性能を高くすることができないので、計算モデルを品質を維持したまま簡易化するなどして、計算処理そのものを単純化する必要がある。

### 2.4.3 聴覚の複合現実感における整合性

VR/MRのための音響効果の表現方法は、VR研究・音響学・心理学など多方面から研究が進められてきた。基礎音響の分野で、バイノーラル録音や音源方向に合わせて頭部伝達関数(HRTF)を反映するヘッドホンが継続的に開発されてきた。森勢ら[79]は、HRTFの個人化の重要性に着目し、HRTFの定位精度向上のためにデータベースに蓄積されたHRTFから適したモデルを合成する方法を示した。

効率的で精度の良い音響合成手法についても調査が進められている。吉野ら[80]は、実世界の自然現象である音の反射・遮蔽現象をMR空間でも実現する方法を検討した。実時間に制限されない音響シミュレーションでは精度の良い手法が提案されている。Lautherbachら[81]はFrustum Tracingと呼ばれる円錐形状を用いた音線追跡法によって、仮想3次元空間内部でダイナミックに変化する音源と、逐次変化する仮想のユーザ位置に応じた音響レンダリング手法を提案した。またRaghuvanshiら[82]は、音の性質を決定するパラメータの一部を事前計算しておき、位置に応じたパラメータを3次元CG内部に紐づけて振り分けておくことで、波動音響学に基づいた反射音や残響音を実時間で計算する手法を提案した。

音の出力に関して、小木ら[83]は16台のスピーカーを没入型多面ディスプレイに配置し、VR上の音源移動に合わせて各スピーカーからの出力

を制御することによって、臨場感のある音響表現を再生する手法を提案している。吉野ら [84] は、ヘッドホンとスピーカーを併用してMRの実現を行うシステムを提案し、スピーカーとヘッドホンの利点と欠点を分類した。渡邊ら [44] は、樽型スピーカーにおける臨場感再現シミュレーションを行った。小林ら [46] は、コンテンツの特徴と臨場感の感覚要素によるコンテンツの分類を試みた。コンテンツは音楽・音声・移動音源の3種類に分類され、包囲感・日常性・定位性という臨場感の評価を決める感覚要素が存在することが示された。

このように多方面からVR/MR音響についての研究が進められているが、音の複合現実感の臨場感向上のために必要な要素は十分ではなく、実世界において屋外で広域を移動しながらMR体験が実現できる提案は少ない。本研究では、聴覚における音の要素の整合性を定義し、それに基づいた音響処理を実装することによって、移動型MRにおける実時間処理を可能にする。

#### 2.4.4 コンテンツ素材の製作技術

VR/MRコンテンツの素材取得手法も重要である。MRは、実行時の環境に合わせてモデルに効果を与えて出力する必要があるため、素材は効果の掛かっていないものであることが望ましい。つまり、物体固有の色である表面反射率や、音源では音響効果の掛かっていないドライソースのようなものをモデルとして使用することが望ましい。

取得及び編集のコスト低減の努力も必要である。新規にVR/MR用のモデルを制作するのではなく、既存の記録やビデオ映像などから使える部分を切り出すことで、コスト削減が望める。鈴木ら [55] は、屋外環境において太陽の光源スペクトルモデルが既知であることを利用して、拡散反射を仮定して物体の表面反射率モデルの取得手法を提案した。Tandent社 [37] はかつて光源分離ソフトウェアを販売していたが、現在は取り扱っていない。竹田ら [54] は、既存のビデオソースから簡単な領域指示によって動く人物を切り出して、人物モデルとして取得できる手法を開発した。

このように、MRの研究の中でも特に屋外での使用や商用利用に耐えうる品質を維持するためには、新しい技術の体系的な研究開発が必要となる。

## 2.5 関連研究のまとめ

このように、VR/MRの基本技術をはじめとする数多くの関連研究や実験事例が存在しているが、観光を主題とした視点に立った分析は多くない。本研究では、観光応用を主眼に置いてVR/MR技術の利用方法と進めるべき方針を探索していく。

AR/VR/MRの技術は主に観光の質を向上するために導入が模索されており、副次的に新しい需要を生み出すことが期待されている。本研究の方針として、基本的にスマートツーリズム構想を推進し、VR/MRはデジタルアーカイブを中心として観光の感動深化に対して特に用いられるべきという立場を取る。

## 第3章 仮想歴史体験ガイドツ アーシシステムの開発と 運用

### 3.1 はじめに

観光のIT化の一つの試みとして、VR/MR技術の応用が期待されている[40]。IT技術が社会インフラとして発展してきているため、インターネットを介した観光案内は広く普及し、すでに多くの旅行者が使用している。観光資源を有する団体や自治体は、地域振興のために観光客の再訪を望んでおり、環境整備やイベントの実施など多くの施策を試みている。現地の魅力を具体的に伝えるための手段として、VR/MRの活用が模索されており、特に現地でしか体験することができないMRは、観光客を呼び込む動機になると期待されている。

観光の心理学的分析によれば、観光客の行動の欲求が循環するような構造で成立していると考えられている。とくにスマートツーリズム構想[21]では、観光が動機付け、学習、訪問、感動、再訪のサイクルであると捉えている。万人に共通する感動の理由を一般的に言葉で表すことは困難であるが、「綺麗な物を見た」「現地でしか聞けない話を聞いた」「実物を見て理解が深まった」など、観光客自身がその場所に行かなければ体験しえないことを体験することであろう。このような観点からVR/MRコンテンツを地域に即したものにすることが重要である。

毎年、秋季に奈良県高市郡明日香村においてバーチャル飛鳥京プロジェクトと銘打たれた歴史体験実証実験が一般の来訪者に対して行われている[58][59]。このプロジェクトでは、CGによって仮想復元した歴史的な風景や事柄を現在の景色に重ね合わせて表示することで、ユーザに時代トリップしたような疑似体験を提供する。ヘッドマウントディスプレイ(Head Mounted Display; HMD)を用いた定点ガイドや電気バスを用いたMRバスツアーシステムが開発試験されてきた。

## 3.2 目的

従来、VR/MR 技術は映像や音の品質を上げて、魅力的なコンテンツを作ることを主眼に発達してきた。この流れを観光応用にそのまま適用することは、観光地の魅力を伝えたいという目的に対して、正しいアプローチであるか疑問がある。現地人と観光客の温かい触れ合いがあってこそ感動が深まるのではないだろうか。

そこで本研究では、タブレット PC と HMD を用いた VR/MR によるモバイル型歴史体験端末を開発し、人と人をつなげるコミュニケーションツールとする運用を試みた。明日香村では観光イベントが盛んに実施されており、地元ボランティアによるガイドツアーが、地元ならではの深い解説を受けられることで好評であった。このガイドツアーと仮想歴史体験を融合し、明日香村内に点在する史跡を徒歩で巡りながら、ガイドの解説を聞きながら、ガイドの操作する歴史体験端末で CG 復元された遺跡や事象を疑似体験するガイドツアー (以下、VR/MR ガイドツアー) を企画した。2012 年 11 月 10 日～25 日の雨天を除く休日の実験を行い、通算 57 名の参加者とアンケート評価を得た。

本研究は、明日香村全域にわたり多く点在する遺跡を VR/MR を用いて仮想復元しており、規模の点でユニークさがある。村内の多くの地点で飛鳥時代にタイムトリップしたような体験を参加者に提供することを目指している。提案システムの VR/MR コンテンツは、考古学的知見に適合するように、史跡整備された礎石の上に五重塔を表示したり、掘立柱跡の穴の位置に建物の柱を合わせるようにしている。

コンテンツと実世界の位置に関する表現において、従来型の WEB ベースのコンテンツと比べ、VR/MR コンテンツと違いがある [65]。また、HMD を用いることで没入感の高い一人称視点の映像を提示できる。HMD を使用する本システムの利点として、スマートフォンやタブレット端末などを利用したシステム [66][67][68] に比べて、より特別な体験をユーザに提供できることが挙げられる。

本研究の提案として、発想を転換して VR/MR 端末そのものを話題としてのコミュニケーションをとる仕組みにすることを考えた。一人一台の機械をそれぞれが持ち歩き使用するという運用ではなく、複数人で共有することでグループとしての一体感が生まれることを狙いとする。ガイドがタブレット端末を操作しユーザが HMD をかけて体験するというように二人一組で使用することを前提として、自然なやり取りの中で言葉が交わされるようにする。ガイドが大勢の参加者を相手に一方的に説

明するのではなく，HMDの掛け方を教えたり，参加者同士で補助しあうなかで自然に会話が発生するようにきっかけを作る．参加者は，観光中は気分が高揚していることと，よく似た興味を持って同じガイドツアーに参加しているので，会話のきっかけさえつかめれば円滑なコミュニケーションがとられることが多い．

### 3.3 関連研究

バーチャル飛鳥京プロジェクト [58] の長年の取り組みの中で，屋外におけるMRやコンテンツ制作に係る要素技術が開発されてきた．本研究では，これらの一部を利用してシステム構築やコンテンツの製作を行った．今節では，複合現実感の演出処理に用いたリアルタイム影付手法と，コンテンツの人物モデルの動画からの切り抜き手法を説明する．

#### 3.3.1 リアルタイム影付手法

角田ら [70][71] は，屋外の光源環境に合わせて光学的整合性のとれた仮想物体のレンダリングをリアルタイムで行う手法を提案した．次の2つの特性を利用してリアルタイムレンダリングを実現する．

- 環境中に光源が複数存在するときに，物体の影はそれぞれの光源が作る影の線形和で表すことができる．
- また，物体と光源の方向が一定に保たれるならば，影の形は変化しない．

実装では，次のようにオフラインでの計算結果を用いて実行時の計算の高速化を実現する．準備段階として，天空をジオデシックドームとみなしてその頂点に光源が存在すると仮定して，予め基礎影画像と呼ばれる各光源からの影の形を計算しておく (図 3.1)．実行時には，全天球カメラを用いて各頂点に対応する光源輝度を取得し，影の濃さを表す係数として明るさを調整して全方向からの影を合成する (図 3.2)．これにより，光源の変化を反映した実時間での影付けを行うことができる．

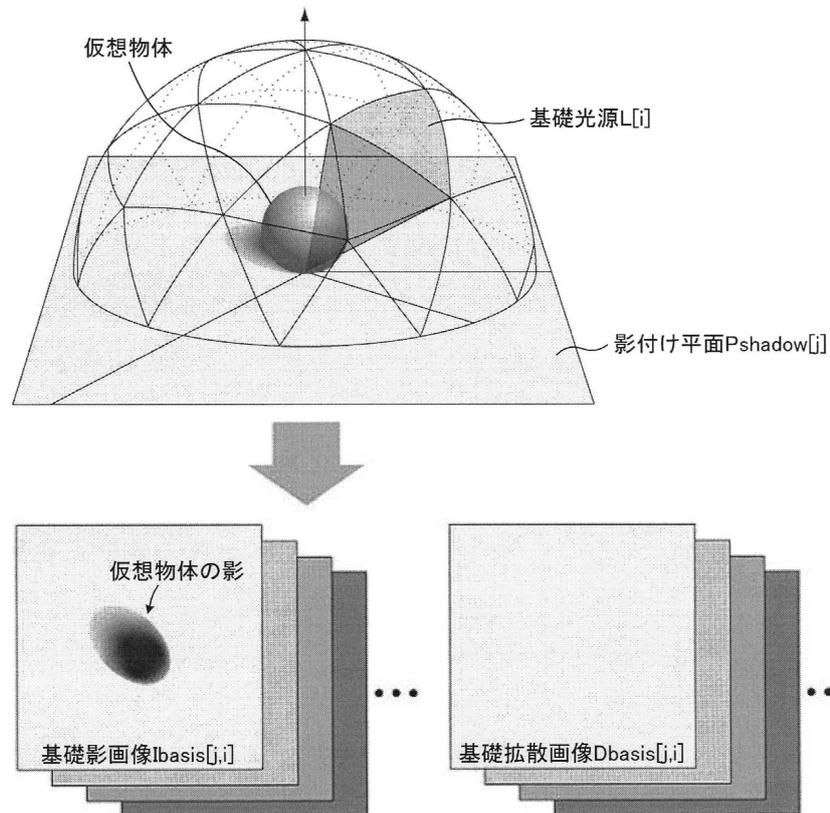


図 3.1: 離散化した光源からの基礎影画像の計算

$$S[1] \times \begin{matrix} \text{Ibasis}[j,1] \\ \text{[Image of shadow from source 1]} \end{matrix} + \dots + S[Ni] \times \begin{matrix} \text{Ibasis}[j,Ni] \\ \text{[Image of shadow from source Ni]} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{Isum}[j] \\ \text{[Image of combined shadow]} \end{matrix}$$

図 3.2: 影の合成計算

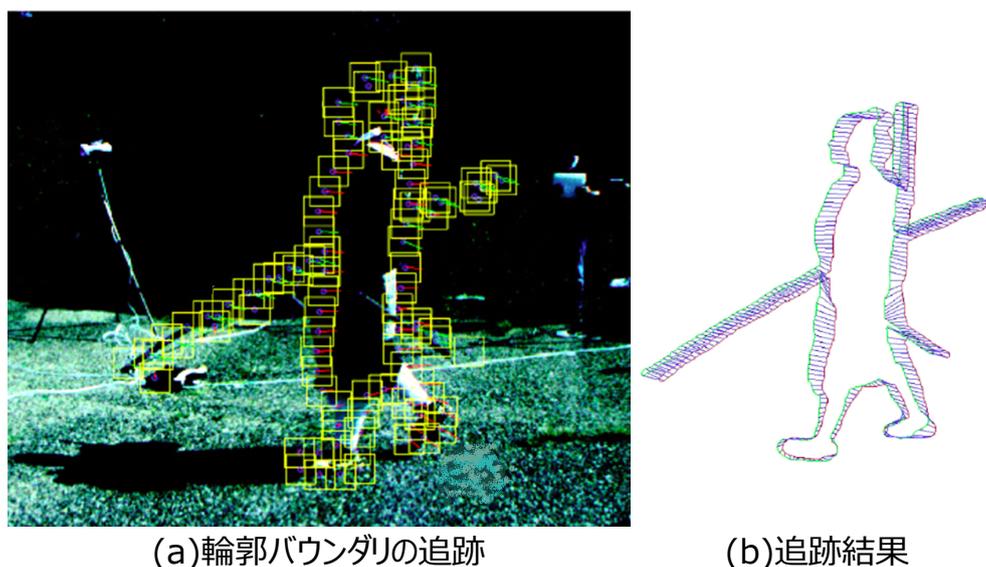


図 3.3: 人物モデルの作製

### 3.3.2 人物モデルの動画からの切り抜き手法

VR/MR コンテンツに人物を登場させたい場合、3次元CADモデルを用いる方法や2次元アニメキャラクターを用いる方法などいくつかの方法が考えられる。千代ら [72] は、動画に拡張した LazySnapping を用いて、領域エッジのバウンダリを追跡することで形が崩れないようにし、動画中の人物だけを連続的に切り抜くコンテンツ作成手法を提案している(図 3.3)。本研究では、この手法を用いて

- 録画されたドラマ番組や記録映像
- 新規に撮影した人物振り付け動画

をもとに、前景と背景を分離することによって人物の動画素材を取得した。本手法は以下の点で活かされる。

- 建物だけを提示する静的なコンテンツに加えて、歩いたり演技をしたりする人物モデルを重ねて表示することが可能になる。
- 人物をコンテンツ中に登場させることで、ストーリーを付けた物語風の見せ方が可能となり演出の幅が広がるので、体験者の興味をよりひきつけることが出来る。

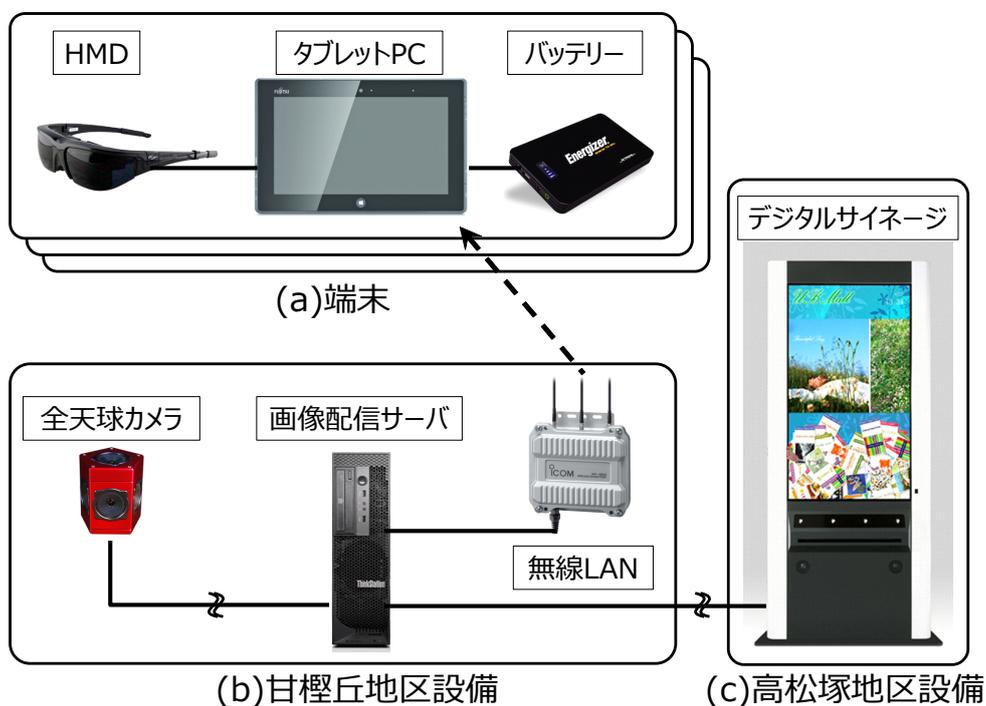


図 3.4: VR/MR ガイドツアーシステムの構成

- CG で作りこんだ人物モデルではなく、実写の人物を利用できるので現実感を高めることができる。

本研究でも VR コンテンツの一部で CAD モデルの人物モデルを用いているが、質感や動きの不自然さを取り除くことはできておらず、その改善方法は今後の課題である。

## 3.4 VR/MR ガイドツアーシステム

### 3.4.1 ハードウェア

図 3.4 に、開発したモバイル型歴史体験端末およびバックボーンの MR システムを示す。

表 3.4.1 に使用機器一覧を示す。

モバイル型歴史体験端末は、HMD とタブレット PC および予備バッテリーで構成される (図 3.4a 参照)。HMD とタブレット PC は長さ 1.2m の

表 3.1: ガイドツアー使用機器一覧

品目	メーカー	型番
HMD	Vuzix	Wrap1200VR
タブレット PC	富士通	STYLISTIC Q572/F (AMD Z60APU 1GHz, 4GB)
バッテリー	Energizer	XP18000
全天球カメラ	PointGrey	LADYBUG3
デジタルサイネージ	富士通	UBWALL
画像配信サーバ	Lenovo	Thinkstation C30 (Xeon E5-2620 × 2 2GHz, 32GB)
無線 LAN	アイコム	AP-800

ケーブルで接続されている。タブレット PC とバッテリーは肩掛け鞆型ソフトケースに入れて一体化して持ち歩くことができる。総重量は 1.45kg であり、連続稼働時間はおよそ 6 時間である。HMD には慣性計測ユニット (IMU) が取り付けられおり、ユーザの視線方向の推定のために使用される。コンテンツの仮想空間の方位は、IMU の電子コンパスが指し示す方位に合わせて表示される。そのため、その場に立って鑑賞すると方位や大きさが感覚的に正しく合うようになっている。タブレット PC にはハードウェアによるシェーダ処理が可能な GPU が搭載されており、実時間で高解像度の全天球動画からユーザの視線方向に合わせて視野を切り出して表示することができる。HMD はカメラを備えないディスプレイ型であり、MR 用のカメラは外付け固定式で、VR 演出を行うコンテンツでは背景をあらかじめ撮影して作成している。MR 演出を行うコンテンツでは、HMD は設備として史跡に設置された全天球カメラの映像を使い、疑似ビデオシースルー型の合成が行われる。GPS のような位置特定のセンサーは搭載されておらず、コンテンツ内の地図に示される定められた場所に立って鑑賞する。

MR の演出を行うコンテンツでは、史跡の施設に全天球カメラと画像配信サーバおよび無線ネットワーク機器が備えられる (図 3.4b)。本研究では、甘檜丘展望台一か所に配置した。画像配信サーバは、全天球画像に基づく光源解析を行い、光源を元にした陰影付を行い CAD モデルをレンダリングした画像をビデオレートで得る。現在の風景は、全天球カメラからリアルタイムで取得される。レンダリング画像と現在の風景が重畳された全天球画像の作成を行い、ネットワーク配信の高速化のために全

天球画像をキューブマップにして6分割で配信する。タブレット端末側でユーザの視線方向に応じて視界を切り出してHMDにレンダリングする。ユーザの急激な首ふりに対応するために、サーバ側で切り出し処理を行うのではなく全天球画像全体を配信している。無線LANを経由して、甘樫丘展望台付近に来たモバイル型歴史体験端末に対して全天球動画が配信される。無線LANは屋外対応型のIEEE802.11n規格準拠の装置を用いて、最大300Mbpsの速度である。HMDの解像度は、 $852 \times 480$ pixelsで、全方位画像の解像度は $1536 \times 1024$ pixelsである。無線LANによる配信フレームレートは、およそ7fpsであった。

さらに、大型のデジタルサイネージ(図3.4c)を遠隔地にある飛鳥歴史公園の展示施設に設置して、同じようにMRコンテンツを配信した。デジタルサイネージは、

- 明日香の玄関口にあたる高松塚地区に位置する飛鳥歴史公園に、現在の甘樫丘山頂の風景を配信することで季節感を伝え、訪問客を誘導すること
- 飛鳥地域全域の遺跡の概略を落ち着いて学べるようにすること
- 時間的・体力的余裕がないためイベントに参加できない観光客にもVR/MRコンテンツの雰囲気을 宣伝するため

を目的に設置した。

### 3.4.2 ソフトウェア

図3.5に、ガイドが操作するソフトウェアのユーザーインターフェースの概要を示す。

最初に飛鳥京全域の地図が表示されており、史跡の位置にボタンが配置されている(図3.5a)。訪れた先の遺跡のボタンを押すと、史跡内の詳細地図に切り替わる(図3.5b)。地図上には、CG復元された見どころにボタンが配置されており、ガイドは実際にその場所まで体験者を誘導し、ボタンを押す。すると、パノラマ画面に切り替わるので、HMDを参加者に手渡して掛けてもらってから、口頭で解説を行う(図3.5c)。ガイドはタブレット画面でユーザーが見ている画面を確認できるので、見ている方向に応じて仔細に解説を合わせることができる。

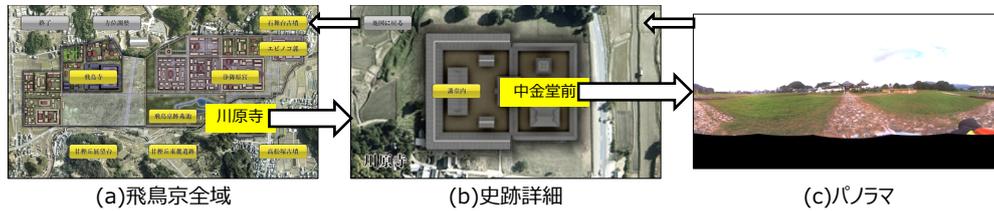


図 3.5: 地図画面の操作

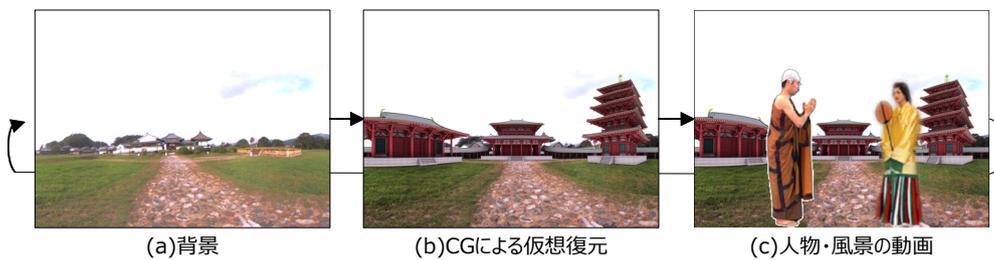


図 3.6: パノラマ画面の操作

パノラマ画面は、タッチパネルを触るたびに (a) 背景, (b) CG による再現, (c) 人物・風景の動画の順に切り替わる (図 3.6). タッチパネルをダブルクリックすると、地図画面に戻る. 地図画面でも、現在の地図と飛鳥時代の復元想像地図を切り替えて表示できる.

誰でも容易に理解できるようにシンプルなインターフェースとして設計した. 飽きを防ぐために、少し複雑さを出すように 3 ステップでの場面切り替えとしている. また屋外での待ち時間は屋内で待たされるよりも長く感じてしまうことがあるので、端末操作の待ち時間が短くなるようにインターフェースの調整を行った. 具体的には、ボタンのタッチ判定領域を表示より広くマージンを持たせて、多少ずれた個所を押しても動作するようにしている. また、コンテンツデータの大半をタブレット PC のオンメモリに先読みするようにした.

### 3.4.3 コンテンツ

VR/MR 技術の一つの利点は、コンテンツ作成の容易さにある. 実世界に改変を加えることなく、新しい演出や効果を試すことができる. コ

ストの抑制と環境破壊の防止につながるため、観光における VR/MR 技術は変化の表現に有用である。

コンテンツの素材として、人物の動画・現在の風景・遺跡の CAD モデルを用いた。写実性を重視して、人物モデルは CAD モデルではなく、実際の人物を撮影して使用した。飛鳥時代の衣装に扮した役者が演技を行う動画を入力として、千代らの手法 [72] にて前景抽出を行った。現在の風景の上に仮想復元 CG をレンダリングし、さらにその上に人物のモデルを重畳表示することで VR/MR システムのコンテンツとして使用した。

#### 調査記録に基づく復元

明日香村には調査記録が残された遺跡が多くある。この場合、発掘図面などを基に CAD モデルを制作した。発掘が進むにつれて考古学的に新しい報告が毎年のようになされており、それに合わせてコンテンツを更新することで、観光客の再訪を促すことができる。

例として、飛鳥京苑池コンテンツを紹介する (図 3.7)。図 3.7a は、復元 CAD モデルによる地形と建物の復元である。図 3.7b は、現存している特徴的な遺物である噴水施設の一部とみられる大きな石造物をモデル化し、水道を通して水が噴き出る様子も再現した。図 3.7c は調査記録図面の一部である。詳細な形状や配置が記録されているので、位置や大きさを正確に合わせた CAD モデルを作成することができる。図 3.7d は、最終的に人物を重畳した復元 CG である。飛鳥京苑池は、日本書紀に天武天皇が 685 年に白錦後苑に行幸されたと記録が残されているその場所だと推測されており、飛鳥川のほとりに位置する 7 世紀ごろの日本最古の本格庭園だとされている。この推測を基に、高い身分の人物が苑池に遊ぶ場面を再現した。貴族の衣装を役者に着せて、背筋を伸ばして遠くを眺めたたずむように振り付けて撮影した。

考古学調査は、現在も盛んにおこなわれており、いまだ全容が明らかになっていない遺跡も多い。十分な記録が入手できない場合は、専門家の考古学的知見を基に作成された復元模型などを基に CAD モデルを作成した。とくに平安期より前の色の記録は少ないため、衣装などは高松塚古墳の壁画から推定復元されたものを使用した。



(a) CADモデルによる全貌



(b) 石造物



(c) 調査記録



(d) 復元CG

図 3.7: 調査記録に基づく復元例: 飛鳥京苑池



図 3.8: 複合現実感による演出

#### 計測データの使用

往時の建造物の大半は木造であったため、腐ったり焼失したりして残っていない。しかし、遺跡の石で作られた部分は、長年の風雨に耐えて現存しているものがある。これらはデジタルアーカイビングによって取得したデータをコンテンツ中で使用した。例えば、石舞台古墳の巨大な石組みは蘇我馬子の墓石との伝承があり、これは現在は完全に露出しているが、当時は墳丘に埋まっていたと考えられているので、レーザーセンサを用いて形状計測して墳丘の再現をした。また、高松塚古墳の石室には極彩色の壁画が発見されており、発掘調査により精細な写真が残されているので、高松塚古墳内部の石室のテクスチャとして使用することができた。

#### 複合現実感による演出

MR の効果的な演出のために、飛鳥京を一望できる甘樫丘展望台に MR 設備を設置した。飛鳥京は、3 方向を山に囲まれており、季節や気象条件により景色の印象が大きく変化する。甘樫丘山頂に設置した全天球カメラの画像に対して、Kakuta ら [70] の陰影付け手法を適用して配信した。図 3.8 のように、甘樫丘から見る飛鳥京全域の風景に重ねて、現在の光源条件により陰影付けした飛鳥京全域 CG を表示した。光学的整合性を調

整した当時の風景と、現在の街並みを見比べることができる。山頂からは当時の飛鳥京全域を見渡せ、京の大きさを体感できる。遺跡の位置にタグを表示する AR 的な演出をしたり、山頂で眺めている遺跡の詳細を調べられるように工夫をした。

現存する物を可能な限り活かして、考古学的な間違いが無いように注意してコンテンツを制作した。

## 3.5 VR/MR ガイドツアー

MR の観光応用は地域に即したものであるべきなので、飛鳥京と明日香村を概説したのちガイドツアーの企画概要について述べる。

### 3.5.1 飛鳥京

飛鳥は、6 世紀末からおよそ 100 年間、日本の中心だった場所である。多くの遺跡が存在しており、石舞台古墳や高松塚古墳のように国の管理下で史跡として整備されている遺跡をはじめ、飛鳥京苑池や甘樫丘東麓遺跡のように現在も発掘調査が進められているものなど大小 50 以上が知られている。古来、日本の建造物は木造であるため、焼失や腐敗によって失われ、飛鳥時代の遺物は礎石や僅かな痕跡が残されるのみであり、直接往時を偲ばせるものは少ない。

### 3.5.2 明日香村

明日香村は、自然豊かな昔ながらの田園風景が広がる地として人気を集めており、若葉や紅葉の季節には多くの観光客が訪れている。しかし、村の報告書 [69] によると来訪者数は年々徐々に減少しており、現在年間 70 万人の観光客があるものの、これはピーク時のおよそ半分まで減少している。そのため、現地自治体や観光団体は来訪者数を増加させたいという意向を持っている。また「飛鳥・藤原の宮都とその関連資産群」として世界遺産登録を目指す機運が高まっており、景観を壊さないための厳しい開発規制が掛けられている。

明日香村には、予算や環境保持を理由に史跡として整備されていない伝承地が多く残されている。そのため、環境を壊さない仮想復元による史跡整備が期待されている。また、観光客の中には歴史に興味を持たな

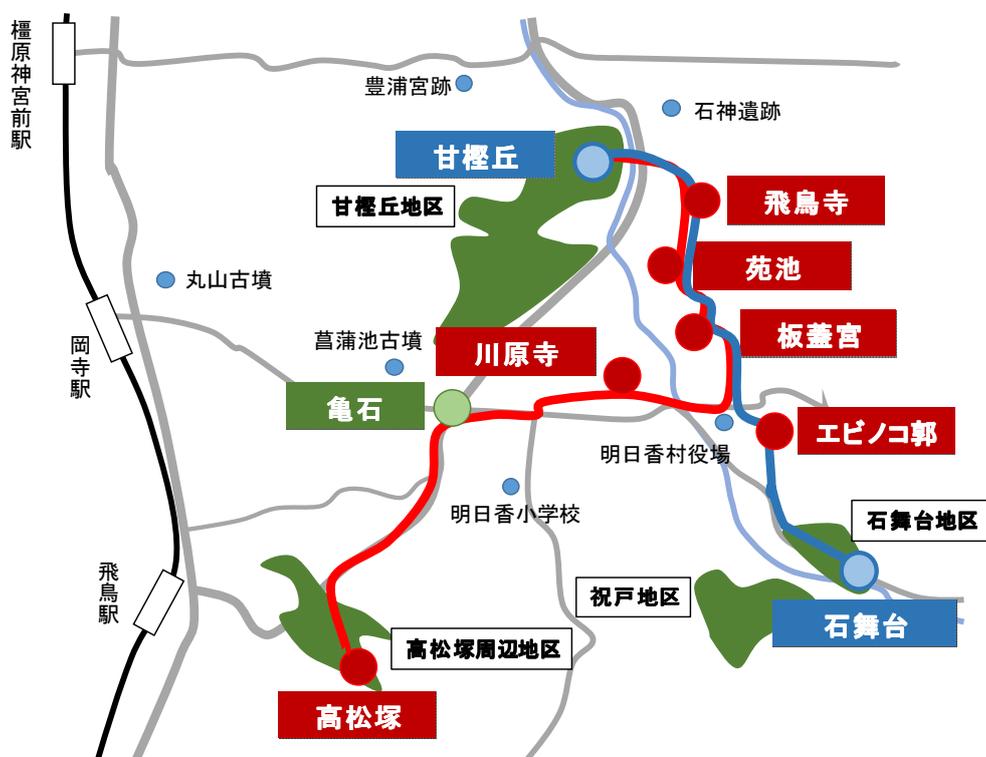


図 3.9: ガイドツアーのコース設定。淡線:1日コース，濃線:半日コース

くても、デジタルアーカイビングやVR/MRによる仮想復元など、新しい技術やコンテンツを体験してみたいという博物館的に興味を持つ層が少なからずおり、新しい需要を見込むことができた。VR/MR 端末をガイドと観光客を結ぶコミュニケーションツールとして運用する模索のほか、このような要請を背景にVR/MR ガイドツアーを企画した。

### 3.5.3 VR/MR ガイドツアーの運営について

2012年度秋季に、VR/MR ガイドツアーの実証実験を行った。明日香村内の遺跡を多く訪れることができるように、効率と安全を考慮してコース設定を行った。体力と時間の都合に合わせて選択できるように、一日コースと半日コースを選択できるようにした(図3.9)。

一日コースには、大小10か所の史跡がおよそ6kmの道程にあり、半日コースには6か所の史跡が3kmの道程にある。鑑賞することのできるパ

ノラマ場面数は、一日コースで7史跡16視点、半日コースは6史跡14視点である。1グループの構成は、およそ10名の参加者にボランティアガイドが2名付き添い、ガイドが1台ずつ端末を持ち運ぶ。全員でコースを徒歩で移動しながら各史跡で立ち止まり、ガイドはタブレットPCを操作して訪れた史跡を選択して表示させながら、口頭で史跡の説明を行う。参加者はHMDを掛けて、好きな方向を眺める。各史跡の滞在時間は20-30分であり、参加者は順番にHMDを掛ける順番を交代し仮想復元CGを楽しみ、ガイドに質問をする。

コースの最終地点は甘樫丘展望台に設定し、歩いてきた範囲を一望できるようにした。ここでは、山頂に設置した全天球カメラと画像配信サーバによって、飛鳥京全域のMRを楽しむことができる。

イベントの導入方法と運営方法について触れる。ボランティアガイドは高齢者が多く、デジタルデバイスの取り扱いに不慣れな人も多かった。そのため機器の操作に慣れるように、ガイドの導入教育を事前に2日間のスケジュールを取った。ガイド全員が実際にコースを回りながら体験して、機器操作の不安を取り除くとともに、参加者への説明の仕方を検討した。

また、HMDを複数人で共有するときは、清掃が問題になる。イベント中は参加者一人毎に眼鏡拭きで乾拭きしてから受け渡し、イベント終了後に水拭き清掃することにした。イベント中に故障や障害が発生したときは、参加者を飽きさせないことが最も重要であるので、対応時間を最短にできるようグループ毎に1セットの端末を予備機として持参した。ユーザが頻繁に触るHMDは多くのトラブルの発生が想定されたので、1) この原理で力が掛かる物理的に故障しやすい箇所は予め補強した、2) 複数の部品は接着して一体化した、3) 倍数の予備機を用意しておくこと、によって対応した。日々のローテーションの機器メンテナンスは、ボランティアの支援を行う事務局が担当し、充電や清掃、機器チェックを行った。機器の故障に対しては、現地に代理店を持つイベント運営会社と保守契約を結び修理を行う体制とした。

平成24年10月から、一般に参加を募集するために、広告チラシを図3.10のように作成し、いくつかのメディアを通して広報活動を行った。期間中、飛鳥歴史公園館にてチラシを配布し、明日香村地域振興室の協力のもと、近鉄の主要駅に2000部のチラシ配布を行った。また、明日香村内の公共施設(明日香村役場、あすか夢の楽市など)にB1版ポスターを掲示した。地域イベントである奈良新聞社主催歴史フェスティバルに参

# バーチャル飛鳥京

Virtual Asukakyo—仮想復元技術でよみがえる古代都市

**バーチャルバスツアー**

日程 2012年11月2日(金)～4日(日)

時間 10:00～15:00 **参加無料**  
11/2は13:00～15:00

場所 伝飛鳥板蓋宮跡 事前申込不要(先着順)

**定点イベント**

日程 2012年11月2日(金)～4日(日)

時間 10:00～15:00 **参加無料**

場所 石舞台古墳・川原寺跡 事前申込不要

ただし石舞台古墳への入場には拝観料が必要です  
お問合せ 明日香村地域振興室 TEL (0744) 54-2001

**バーチャル散策ガイドツアー**

日程 2012年11月10日(土) 11日(日) 17日(土)  
18日(日) 23日(金・祝) 24日(土) 25日(日)

時間 半日コース 10:00～13:00 **参加無料**  
一日コース 10:00～16:00

事前申込制 各日20名程度(先着順)

解散場所 甘樫丘展望台

お問い合わせ・お申込み 飛鳥管理センター  
TEL (0744) 54-2441 時間 9:00～17:00  
イベント詳細 HP <http://www.asuka-park.go.jp/news/>

明日香村を散策しながら、  
古代の飛鳥を体験してみませんか



ヘッドマウントディスプレイで  
360度パノラマ映像体験



明日香村アクセスマップ



近鉄路線図

主催 国営飛鳥歴史公園事務所 明日香村 東京大学池内・大石研究室

図 3.10: 広告チラシ図案



図 3.11: MR ガイドツアーの様子

加しチラシ配布とポスター掲示を行い、10月25日付奈良新聞の広告としてイベント告知を行った。

### 3.6 実験

2012年11月10日～25日の間の雨天を除く休日に、一般からの参加者を募りガイドツアーイベントを開催した。雨天時には、来訪者に対して高松塚遺跡において定点イベントを実施した。イベントの様子を図3.11に示す。

イベント終了後、解散場所の甘樫丘山頂にて、参加者にはアンケート調査に協力してもらい、企画とシステムについての評価を求めた。ガイドにも記入式のアンケート調査を行い、運用面についての評価を求めた。通算57名の参加者のうち53名、および14名のボランティアガイドの回答協力を得られた。参加者の男女比率は50%づつで、年齢構成は60歳以上35%、50歳代23%、40歳代18%、30歳代16%、20歳代8%であった。参加者の住所は、およそ半数が明日香村近郊からの参加で、3割が近畿圏在住、2割が北海道を含む遠隔地からの参加であった。

一般観光客を対象とした観光体験のアンケート調査には、同じ被験者による比較評価が難しいという問題がある。観光体験の感動は初回のインパクトが最も強く、一般に遊園地のようなアトラクションの例を除いて複数回の体験を試みることは無く、また、観光旅行中の時間は貴重で

あるので多くの時間をとることはできないためである。さらに、多くの旅行者は観光旅行中は楽しむという目的を持っているため、多少の興奮状態にあり物事を冷静に評価しようという精神状態になく、そのため本アンケート調査においても、冷静で客観的な意見から評価を得ることは難しかった。しかしながら、観光サービスにおいて一度の体験で”楽しさ”を提供することは重要であり、定量的な評価のみでなく、主観的なコメントの分析も重要であると考えられる。そこで、選択式評価の他に、自由記入形式で寄せられた参加者とガイドの声を示し、分析する。

### 3.6.1 アンケートの内容

以下に、アンケートの質問と奥的を示す。設問は選択方式とし、自由記入形式で詳細を述べられるようにした。

[参加者アンケート]

- A. 企画についての満足度調査  
問. ツアーを体験してみていかがでしたか？  
1. 分かりやすかった, 2. 解説だけでいい, 3. どちらともいえない, 4. 満足できなかった
- B. 再訪を誘導できているかの調査  
問. またツアーに参加したいと思いますか？  
1. 思う, 2. 思わない, 3. どちらともいえない
- C. 本システムの適用先調査  
問. 今後バーチャルで見たい場所がありますか？

[ガイドアンケート]

- D. 企画とシステムの課題調査  
問. ツアー中, 気になったこと(良いことも悪いことも)を記入してください。
- E. システムのトラブル調査  
問. 機器障害があった場合は, 以下に内容を記入してください。

### 3.6.2 実験結果

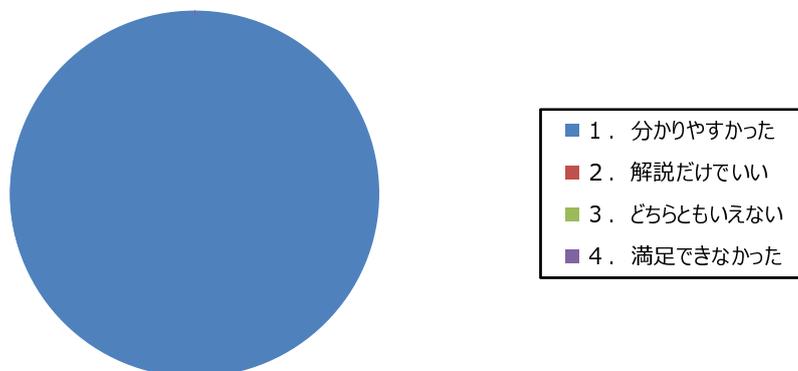
### 選択式アンケートの集計結果

選択式アンケート結果を図 3.12 に示す。A の設問に対して全員が“1. 分かりやすかった”を選択し、B の設問に対して全員が“1. 思う”を選択した。C の設問に対し、藤原京や平城京などの近隣の都を見たいという回答が最も多かった。次に、山田寺・大官大寺・難波宮などの近隣に存在したが現存していない遺跡が多かった。その他は、一つの時代の切り抜きではなく時代の変遷を見たいということや、大倉らの提案 [73] のような空を飛んで鳥瞰で見たいということが挙げられていた。実世界では実現できない時間や重力といった物理パラメータの超越が興味を引いているようである。

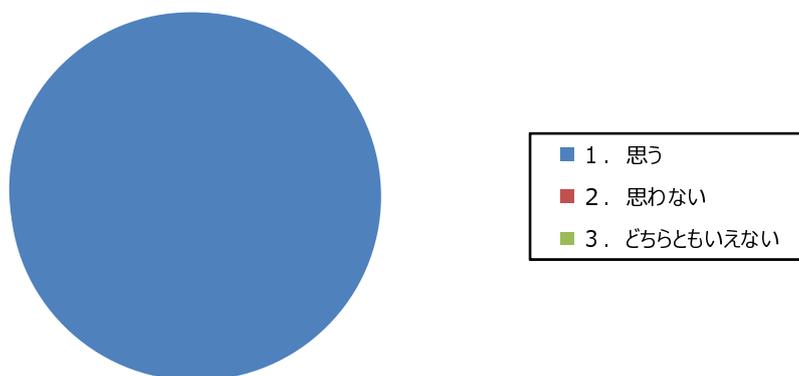
### 利用者の意見

自由記入形式で寄せられた利用者の意見を下記に列挙する。

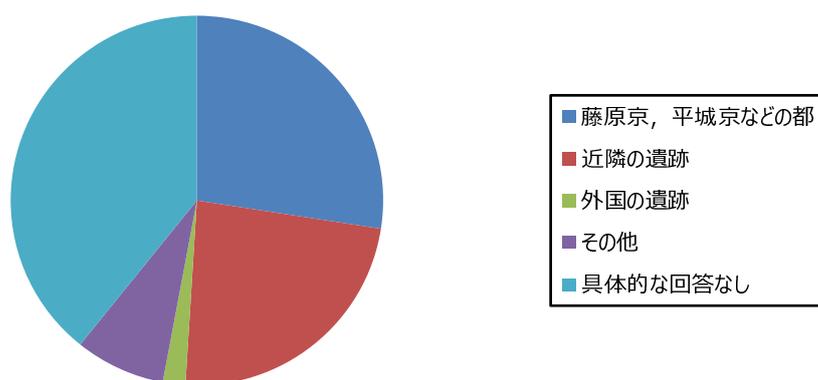
- 飛鳥時代にタイムトリップした感じで楽しく見せてもらえました。
- 明日香の事が多少理解出来ました。有意義な半日でした。ありがとうございます。
- 実際に見学し、バーチャルで昔を再現して教えて頂き、よく分かりました。ありがとうございました。
- 大変お世話になりました。ありがとうございます。
- 参加して良かった。
- リアル動画に合成したバーチャル R をみてみたいです。
- 私たち 2 人の参加の為に、お 3 人の方がついて下さり、ゆったりと分かりやすく解説をして頂きました。とてもよかったです。ありがとうございます。又改めて自分でも歴史を学び直し、再び参加するとまた違った味を感じられるように思い、楽しみです。(注記. キャンセルのため参加者が少なかった。)
- 奈良に住んでいながら、なかなか飛鳥まで足を伸ばせずにいましたが、最近になって歴史に興味湧いてきて、今日のイベントに参



(A)企画についての満足度調査



(B)再訪を誘導できているかの調査



(C)本システムの適用先の調査

図 3.12: アンケートの集計結果

加させて頂きましたが、マンツーマンというとんでもなくラッキーな時間を頂きました。バーチャルな映像を通して千年も昔の飛鳥を体験させて頂きました。何とも美しい時間を見せて頂き感謝しています。

- 個人で周ることのできない所を沢山見せてくださってありがとうございました。
- 集合場所を現地の人も知らなかったので関係者には知らせておいて欲しい。
- 詳しく説明して下さいました。本当によかったです。
- バーチャルで1400年前にさかのぼって、暫く古人にかえてロマンに浸ることができた。充実を望みます。
- 集合場所がわかりづらかったです。箱物を建てるのではなく、とってもいいと思いました。
- コンピュータ等のシステムやコードを上手に収めるバックがあるとよいですね。
- ガイドさんが絵で紹介してくれたが、入鹿が切られた場所など、短いドラマ風になっていると分かりやすい。
- 現在と見えない部分を可視化する組合せはとてもわかりやすく興味を持って散策することができました。
- 解説が非常に面白く、バーチャルと合わさり楽しかった。
- 明日香村を楽しく散歩もできて良かったです。
- 良い企画でした。
- 現実の時とバーチャルの時で、同じ位置だと分かりやすいのですが、位置が違くと分かりづらかったように思います。バーチャルの中にも解説を入れるといいかもしれません。飛鳥のすばらしさを教えていただきました。ありがとうございました。
- より自由視点になるとうれしいです。

- 少人数だったため、とてもよかった。
- バーチャルで見る時、自分の立ち位置がわかるとよいと思う。
- 歩きながら色々と歴史を学べてとても楽しかったです。
- 近くに住んでいても来ないので知らない事ばかりでした。とても楽しく、また参加したいです。
- とても楽しかった～。勉強になりました～。
- 眼がねをかけずに大画面で観賞しても面白いのではないかと。情報量が増えるが、望遠になるのも良い。
- イメージしやすく散策の興味が增加される。ズーム機能でより詳細が見られるともっと面白味が増すように思う。
- 機材の取り扱いが大変そう（運搬）。自分の頭にイメージしていた事と大変異なり参考になりました。
- バーチャルの中をさらに動けると面白い。
- 楽しかったです。スタッフの皆様、親切でありがたかったです。
- その場に行ってみるとというのが面白かったです。出来るならもっとたくさんの地点を立ち止まってというより歩きながら見てみたいと思いました。（交通事情・建物事情で難しく危険とはおもいますが）いい経験になりました。ありがとうございました。
- 今日はとても楽しい1日を過ごしました。有りがとう。
- スタートから終点までずっとゴーグルつけて歩けたらおもしろいと思いました。
- 大変よかったです。ありがとうございました。

### ガイドおよび補助員の意見

自由記入形式で寄せられたガイドおよび補助員の意見を下記に列挙する。

- ツアー企画は非常にすばらしく、お客様の反応はよく、喜んで帰られた。
- 時間が足りない。散策も大きな明日香の魅力。
- 歩行中のお客様管理を。
- 画面が見づらい。
- 画面のタッチがもう少し緩やかでも画面が動くようになればよい。
- 子供さんも同行で楽しんでくれましたし、喜んでくれました。少し風が有って肌寒かったですが、楽しくガイドが出来ました。
- 甘樫丘でバッテリー切れ。
- 画面が太陽の出てきた時見にくかった。
- 参加者が2名で家族的雰囲気非常にやり易かった。特に歴史に興味のある方々で。参加者の少ないのが寂しいが…。
- 去年よりも楽になった。客が少ない。
- 接触不良が若干。直ぐに修正してもらえた。人数が少ない時には手間取るのではないか…。
- 接触不良。すぐに復帰。ワイヤレスになれば良い。
- 映像技術が進んだこと。出来れば参加者が機会を自由に使えば(映像の選択)。
- ガイドする前に全体の様子を簡単に説明し、回ると関心度が上がると思う。
- 光が強いと操作画面が見にくい。
- 画面がタッチしないのにもどる。

- 雨に画面が反応し，画面がもどる即復旧済．史跡を案内するのにもっと増やすべきと思う．関連すべきものと合致させると大変よい．
- 発掘結果の検証されたものをもう少し反映した形でバーチャル画像に取り込んで頂きたい．
- 再現場所を増やしてほしい．
- 皆様方、協力的でスムーズに進んだ．
- 案内はバーチャル観る箇所も歩く道沿いに説明した状態で良かったと思います．
- 晴天の時，タブレット画面が見にくい，コース中の鬼の雪隠，天武陵もバーチャルほしい．一時フリーズング．
- 表示項目ボタンのずれ．初期化やりなおしで対応．
- 画面が光って見にくかったですのでカバー等（ひさしがわり）をつけていただけると操作がしやすいと思います．
- パッドにひも等をつけていただけるといい．
- 光で画面が見にくいので被いが欲しい．
- 2台のHMDでレンズが外れ，落下していた（周囲の方から教えてもらい気づく）．機材収納時に白いHDMIケーブルだけ取れて落下したのに気づかず，周囲から教えてもらって気づく場面もあった．

### 3.6.3 考察

#### 選択式アンケートに対する考察

アンケート結果を考察すると，全員が解説を理解しやすく思い，再びイベントに参加したいというとても良い結果であった．イベントの新規性もあり，参加者にとってVR/MRガイドツアーは初めての体験であり，小さい問題は減点の対象にならなかったため採点が甘いと考えられる．し

かしながら、全員が再び参加したいと回答したことは、VR/MR 技術の観光への導入は再訪を促すために一定の効果を持つと肯定的にとらえてよい。

### 記入式アンケートに対する考察

イベントを実施した上での良かったことや課題などについて、以下に記載する。

#### i) 利用者からの意見

ツアー全般的に好評であり、歴史への興味が更に深まったという意見が挙げられるなど、全般的に有意義な企画であるという評価であった。これは十分なガイドさんの配置によることも大きいと考える。一方、コンテンツに対する要望として、リアルな画像で見たい、立ち位置のズレによる分かり辛さの改善、コンテンツ内への解説の追加、ズーム機能、もっと多くの場所のバーチャル画像を見たい、などの意見があった。また、運営面への指摘事項として、集合場所の分かり辛さの改善、機器取扱いの不慣れな点（ケーブルの取り回しや収納方法）を指摘される意見もあった。

#### ii) ガイドからの意見

ツアー全般的に好評であり、参加者と楽しみながら案内ができた様子であった。去年度の試行実験よりも楽になったという意見もあり、全般的に有意義な企画であるという評価を得た。一方、実施日によって悪天候による急なキャンセルのため参加者が少なくて寂しいといった意見や、歩行中のお客様管理など、広報や運営中の課題も挙げられた。また、画面の見辛さや接触不良、ケーブルの扱い辛さ、バッテリー切れといった機器操作に関する改善意見も散見された。利用者と同様にコンテンツの増加してほしいという要望もありいくつかの課題も残った。

#### iii) 補助スタッフの立場からの意見も含めた、良かった点と課題の整理 〈よかった事〉

1. ”良かった”, ”勉強になった” など利用者からは概ね好評であった。
2. 解説に加え、VR で昔を視覚的に見れる事は、よりリアルにイメージできるため大変好評であった。
3. 移動中もガイドさんと山や花など、いろんな話をしながら散策できる点が良い。

4. 散策により普段通らない明日香村の道を散策できる事、またバーチャルとは関係ない情報も教えてもらえる事が利用客から好評を得ていた。
5. ガイドさんが親切丁寧で、利用者のサポートが十分であった事も好評に繋がったものと思われる。
6. 雨天時に定点イベントを実施し、多くの方に利用してもらった事も良かった。

<課題など>

1. 集客方法. 県の広報媒体などを広く活用し、もっと集客効果の高い方法の検討が必要。
2. 雨天時の中止決定タイミングや連絡体制の確立が必要。
3. 集合場所が分からなかったという意見あり。目印（看板や旗）なども必要。
4. 集合場所に遅れた方、場所を間違った方がいた場合の対応方法を確立する必要あり。また、ガイドさんが当日来られなくなった場合の対応なども必要。
5. ガイドさんによっては、説明後にバーチャルを見せる人もいれば、直ぐにバーチャルを見せる人もおり、ガイド方法についてもやり方の統一が必要かと感じた。
6. 利用者にはある程度知識がある人と、そうでない人がいるため、各解説ポイントではバーチャルで見せる前に、そこが何なのかを説明した方がよい。これだけはガイドさんに伝えてもらいたいガイドポイントを予めまとめるなどの工夫があってもよい。
7. 雨天時に備え、定点で閲覧できる場所があると、雨でも利用者は明日香村に来るのではないかと思われる。飛鳥歴史公園館内に自分で操作ができるバーチャルPCがあっても良いと感じた。
8. ツアー中及びツアー後に雨が降った場合の対応も予め検討が必要。

9. ツアールートの全体地図とタイムスケジュール及び解散後のバス案内が書かれた資料を予め配布すると、どこを通過してどこに向かおうとしているのか、これからどういったルートを見るのかが分かる。次に見る場所の知識を移動中にガイドさんに聞く事もできる。
10. 外光による操作画面の見づらさに課題があり、明るさを高くするとバッテリー駆動時間が減る問題も起きた。
11. HMD とタブレット PC は首にかけたまま持ち運ぶ方がよい。ケースに出し入れするのに時間を取られるため、ケーブル類は簡単に納められるようにした方がよい。
12. バッテリー時間にもよるがケーブルの抜き差しがあると、トラブルの原因になりやすい。トラブルへの対応はガイドさんだけでは難しい。
13. HDMI の変換端子が外れやすいので紛失の可能性あり。
14. HMD のレンズが取れ、取れた事に気が付かない事があった。予備を多く準備する必要があるかもしれない。
15. 高松塚古墳や石舞台、甘樫丘などは観光客が多いため、定点イベントだけでも利用客は多いと思われる。また、定点イベントをやる事でバーチャルの認知度が上がると思われる。
16. VR に拡大機能があるといいという意見あり。甘樫丘では双眼鏡で見た拡大画像に VR があるとよりリアルになるのではないか。
17. 解散後の移動が大変。解散の場所についても検討が必要か。解散場所からレンタサイクルで帰れると便利だろう。

### 課題に対する改善案

課題について、考えられる改善案を以下に記載する。

#### 運営方法の改善

- 集合場所には看板か旗を掲げる。ツアー中も持ち歩く事により、広報となる。

- 雨天時の中止連絡タイミングは前日の降水確率70%以上で中止とするなど、一定の基準を設ける（ツアー中の雨への対応含む）。なお、その際定点イベントを実施するならば定点イベントの場所を案内する。
- 集合に遅れた方やツアー中に具合が悪くなった方への対応についてマニュアルを確立しておく。
- ガイド方法のマニュアルを確立する。伝えるべきポイントなどを整理する。

#### バーチャル機器の改善

- PCの収納を止め、首からかけてツアーできるようにする。映像ケーブル等は肩や腰などに掛けられるようにする。その際、コネクタ部分の抜けによる紛失防止対策を施す。
- 可能であればバッテリー持続時間の長いPCに変更する。また、スリープからの復旧時にケーブルを再接続しなくてもいいようにする（ハードウェアの再認識ボタンの用意など）。
- 機器障害時、対応が難しい場合は再起動により復旧させる方法をガイドさんに広く周知する。

#### コンテンツの改善

- ズーム機能の検討。解説文の追加検討。
- 各コンテンツでは、画面タッチで、画像⇒バーチャル合成画像⇒人物登場という切替を行っているが、最初からバーチャル合成画像で既に人物を登場させてもよい。

#### 集客の手法

- 県の広報媒体や鉄道、旅行会社、イベントPR会社などを選別し、アンケートにより効果測定を行って、最良の広報媒体を選定し、定期的に評価する。

良かった点には、参加者の反応が良くて楽しくガイドができたとの声が多く挙げられた。参加者アンケートの自由回答欄にも同様に良かったとの声が寄せられており、参加者がボランティアガイドの親切な対応に触れて共に楽しんでもらうことができたものと考えられる。参加者と

ボランティアガイドの両者から楽しかったという回答が得られたことは、VR/MRの観光応用の可能性を知るうえで、最も重要な知見であろう。

前年度に本システムのプロトタイプ開発を行った際には、ガイドを対象としたアンケートでは下記のような多くの課題が挙げられていた。参加人数は、2011年12/3（土）11名、12/4（日）13名 計24名であった。

- 途中、降雨の際の対応が難しい
- 説明者と操作補助者の連携を上手くする必要あり
- （開発スタッフ同行で楽な気持ちで歩いたが）装置の最初の起動、トラブルの解消法などに不安がある
- コンテンツは全体像→個別の流れが好ましい
- 立ち上がり、接続のスピード化、機材の小型化
- 遠距離時のズームができれば
- メガネで見ている方向とCG画像が一致しないことが多い
- （客数が少ないので今日は十分だったが）折角歩くならもう少し台数が多い方がよい
- 参加者に映像地点の説明が欲しい
- もう少しはっきりした映像が欲しい
- もう少し小型化と動作の安定性が必要
- 各ゴーグルからもシーンセレクトできるようにすればよいのでは？
- 建物の名称を入れてあればもっと理解しやすいと思う
- システムの操作をしながら音声での説明があればより分かりやすいと思われる
- 甘藷丘周辺、南方面が少し分かりにくい
- 文字説明がもう少し小さく、もう少し多くあればよいのでは？
- 機材の持ち運びがもう少し軽く・小さくなるとありがたい

- ガイドの説明と MR システムがうまくかみ合えばとても面白くなると思う
- 飛鳥寺がよかった，壁画も面白かった
- 機材の持ち運びを持ち歩きやすい方がよい
- 文字が入ったら分かりやすい
- ゴーグルは軽くできないのだろうか？

これらの問題の指摘は 2012 年のアンケート結果からは大幅に減少しており，継続的に大勢のユーザに使ってもらうことで企画やシステムが改善されている．ガイドからのフィードバックをシステムに反映することで，ユーザーの扱いやすいシステムに近づけることができ納得して使ってもらうことができた．

その他として，近隣に在住する参加者がおよそ半数いたことは注目に値する．観光地周辺に住んでいても，観光地には行かないということがままある．VR/MR を用いることによって，近隣の住人にとっても風景を目新しいものに変化させることができるため，見てみたいという動機を植え付けることができることを示している．さらにコンテンツを頻繁に更新することで継続的に人を呼び込むことができることは，新しい需要喚起に効果がある．

VR/MR 技術を，現地の人と観光客のコミュニケーションツールとして用いることの是非を検討する．VR/MR 端末を電話の発展装置としてコミュニケーションに使うことの技術的な敷居は高くない．しかし，そのような物を必然性もなく観光地に配置したとしても，観光地の魅力向上にはつながらない．旅行での人と人の関係は，多くの場合はお互いに初対面であり親しい間柄ではなく一期一会であることが多い．距離が近しくない人同士が円滑なコミュニケーションをするためには，一定の距離を保つことが重要である．実際に対面して人と人がコミュニケーションを取ることに比較して，機械越しのコミュニケーションは偽物のような感覚を覚えるのは否めない．また，話題が存在しなければ，会話は成立しない．2 者間の興味の範囲が類似していれば会話の目的を一つにすることができるので，会話のきっかけさえ存在すれば円滑に進むことが多い．今後，スマートフォン以上に VR/MR 技術が発達した場合にはわからないが，現時点で地元の人と観光客のコミュニケーションのために VR/MR 技術を直接的に使うことは否定的であり，実際に面とむかった

対話を重視すべきである。したがって、コミュニケーションのためにVR/MR技術をもっと積極的に用いるための方策には工夫が必要である。

### 3.7 まとめ

本研究では、VR/MRを用いたモバイル型歴史体験端末を開発し、奈良県高市郡明日香村において、一般の参加者とボランティアガイドによるVR/MRガイドツアーを施行した。歴史体験端末の開発について、ハードウェア・ソフトウェア・コンテンツの製作手法について説明し、運用方法についても説明した。参加者とガイドにアンケート調査を行い、システムとイベント企画についての評価を求めたところ、VR/MRの観光への適用の観点から良い結果が得られた。運用面では、天候に対する対策が大きな課題である。屋外で使用される機会が多いと想定されるので、機器やコンテンツの気象変化への対応のための研究開発を進めなければならない。

また開発したシステムは、国営飛鳥歴史公園事務所にて現在も運用されており、ガイドツアーの他に定点ガイドや地域の小中学校の歴史学習ツールとして利用されている。デジタルサイネージによる歴史体験端末と観光案内は、常設展示として毎日運用されている。

どのようにVR/MRを使えばよいかかわからないということが、観光応用をはじめとする普及の妨げになっている。機器やインターフェースの複雑さや反応の鈍さは使用者の不安の原因になるので、極力取り除く必要がある。

VR/MRの実用化においては、技術が確立するまでの当面の間、技術者自身が、細目にわたりコンテンツを含めた具体的なアプリケーションやイベント運営まで面倒を見ていく必要があるだろう。本プロジェクトの事例が、そのような問題解決の一助になることを期待する。

## 第4章 移動型MRを用いた歴史 体験コンテンツと音響 MRの開発

### 4.1 はじめに

MRを用いた観光促進のためのコンテンツには、エンターテインメントが必要であり、そのためにはストーリーのあるコンテンツの演出が有効である。MRは技術が先行して開発されてきた経緯があり、実用のためのアプリケーションとなるコンテンツが求められている。一つの答えはゲームであるがそれを除けば、多くの複合現実感コンテンツは、過去に存在した建造物の仮想復元のような静的な物体の再現を中心に取り組みられてきており、動的な物事の仮想復元に取り組んでいる例は少ない。動的な物事の仮想復元の例として、崔ら [61] の山鉾巡行のVR復元が挙げられる。これは、山鉾巡行のCGアニメーションと立体音響を用いて振動台上で鑑賞するシアター型システムであり臨場感の向上に注力していた。しかしながら、専用の大きなハードウェアを固定設置する必要があり、またコンテンツは実際の祭りの再現であるのでストーリー性は無かった。そこで、本研究ではストーリー性を持たせた動的な複合現実感コンテンツの演出方法について検討していく。

多くのMRシステムでは、体験者は自身の動作に伴って、映像を360度任意の方向に眺める自由が与えられている。行動の自由の幅が広すぎる場合、コンテンツ制作者の意図とは合わずに体験者が視線を送っていない方向で演出されているイベントに気が付かないという問題がある。音声により気配を感じさせることによって、ユーザの視線方向を暗に誘導することができ、演出の幅を広げることができる。ストーリーを構成するナレーションやBGMの他に、セリフや衣擦れなど人物が発する音なども、空間に関連付けて演出されることが望ましい。また、映像と同期した音響効果により空間の広さ・距離感・方向・音源の数の多さなどを表

現できれば、演出の相乗効果が期待できる。

歴史的事象を MR で現地で再現したいと考えると、そのような事象が一か所に留まって起きたとは限らず、ある程度の広さを持った範囲で起きていた場合も考えられる。広い範囲を MR 機器を携帯して歩いて移動するためには機器が小型軽量である必要があり、また移動中の安全を確保する手段も必要になる。乗り物に乗って広範な地域を移動しながら体験することのできるようにすれば、機器の大きさや重量の問題を回避しつつ大勢の人が同時に安全に MR 体験を楽しむことができる。移動型 MR では、時系列に場面が変化していくコンテンツが必要となり、映像の演出と同じように移動とともに変化する音の演出も重要である。また、旅行中の史跡間の移動を兼ねて、移動しながら MR 体験すれば移動中の無駄時間を減らし観光体験の充実を図ることもできる。

## 4.2 目的

本研究ではユーザが自由な方向を見ながら大規模空間を移動する MR において、ユーザの動きに合わせて方向・距離・空間の広さを感じることで音響システムを提案する。音響システムは、次の3つの要素で実現される。

- 慣性計測ユニット (IMU) 搭載オープンエアヘッドホン
- 画像法の画像処理を利用した音源配置
- GPS を利用した音源コンテンツの位置管理

移動型 MR のようなモビリティシステムでは、搭載可能なバッテリー容量の問題から消費電力を抑えるために計算機の性能に制限があるため、現実的な音響処理方法を定める必要がある。

移動型 MR システムに、開発した音響処理手法を搭載し、移動しながら場面が移り変わっていく全方位コンテンツを制作し、VR/MR の観光適用への有効性の確認のために実証実験を行った。奈良県高市郡明日香村において仮想復元した古代飛鳥京を電気バスに乗って移動しながら往時の様子を体験できるツアーを開催した。大化の改新のきっかけとなった乙巳の変を、ストーリー仕立ての演出で仮想復元のコンテンツにして、提案手法の効果を検証した。一般の観光客来訪者に体験してもらい、体験終了後アンケート調査を行った。有効被験者数 139 名の 93% から楽し

めたという回答が得られ、66%から音響効果がよく感じられたという回答が得られた。

### 4.3 関連研究

本研究に先行して大石ら [78] は、MR 装置を電気自動車に搭載して実空間を移動しながら体験できる移動型 MR を開発し、平城遷都 1300 年記念事業のイベントとして平城宮跡において電気トラムに乗って移動しながら仮想復元した平城宮の様子を体験できるツアーを開催した。このシステムは、車体左右 2 か所に取り付けた全方位カメラによって周囲の風景を撮影し、仮想復元した建物や人物モデルを重畳表示することで MR 映像を生成し、ユーザは姿勢センサの付いた HMD を覗いて、復元された世界をそれぞれ自由に眺めることができた。このシステムは、従来の MR ではユーザが広範囲の移動をできないという問題を解決している。

音については、電気トラムに固定された車内スピーカーを用いて、トラムの乗客である体験者全員に向けて出力された。トラムは屋根はあるものの外気にオープンな構造であり、スピーカーの音だけでなく外部の音もユーザーに直接届くようになっている。コンテンツ中の音響表現は、空間音響ライブラリ OpenAL を用いて、コンテンツとトラムとの仮想的な位置関係に応じて音量調整をすることで行われた。しかし、ユーザー毎の位置や姿勢を考慮した演出ができないため、音源の存在を感じられなかったり定位が定まらないといった臨場感が不十分であるという問題があった。

### 4.4 音響モデル

モビリティシステムで使用できる計算機のリソースは、電源容量と使用時間のトレードオフの関係で決定される。観光目的を考えると、システムの稼働時間は最低でも半日確保されないと実用化が厳しい。そのため、可能な限り計算量の少ない方法で豊かな音響を作りたいという課題がある。一般に 3 次元空間の音響では、空間すべての領域およびすべての時間における音のエネルギー伝達を計算することで正確な音響の計算結果を得る。今回は、ユーザの耳に届く音だけを実時間で計算できれば良く、そのために正確さを追及するよりも空間演出の効果が大きい音響処理を効率的に選び、再生できるようにしたい。そこで、

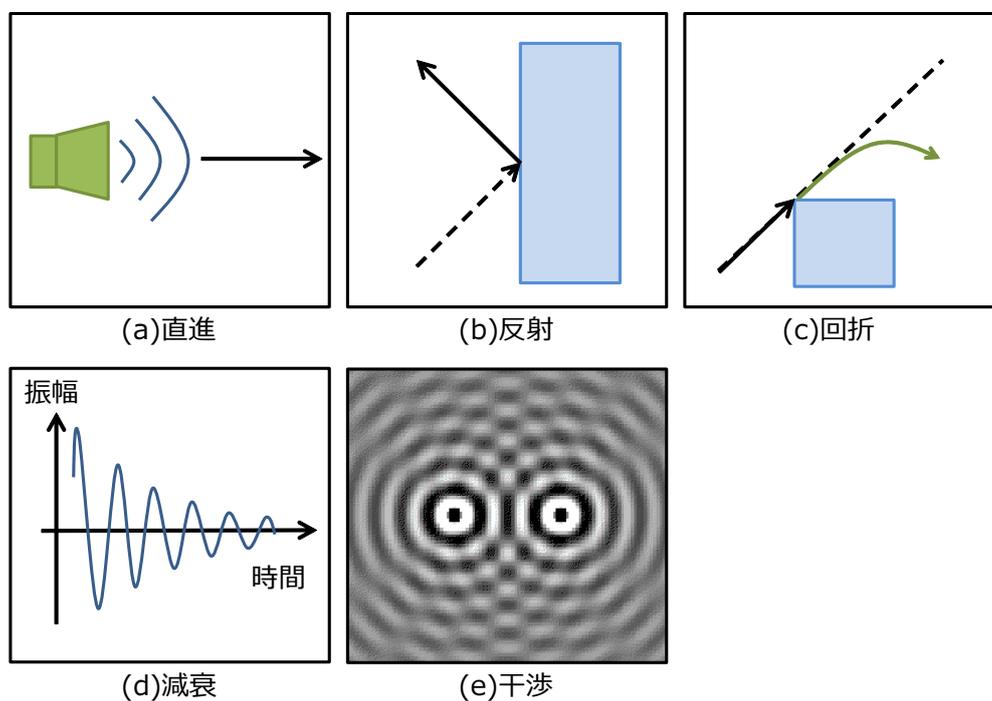


図 4.1: 音の物理的性質

- 障害物についての音の物理的な性質
- HRTF による定位間の表現

に注力し、空間音響処理を効率的に実装できる方法を検討したい。

#### 4.4.1 音の基本物理特性

音の特徴的な物理特性のうち、本研究にとって重要な性質 (図 4.1 参照) を検討する。

##### 直進

音波は媒質中を原則的に一定速度で直進する (図 4.1a)。空気中では温度に依存し、経験的に式 4.1 で表されることが知られている。

$$c = 331.5 + 0.6t \quad (4.1)$$

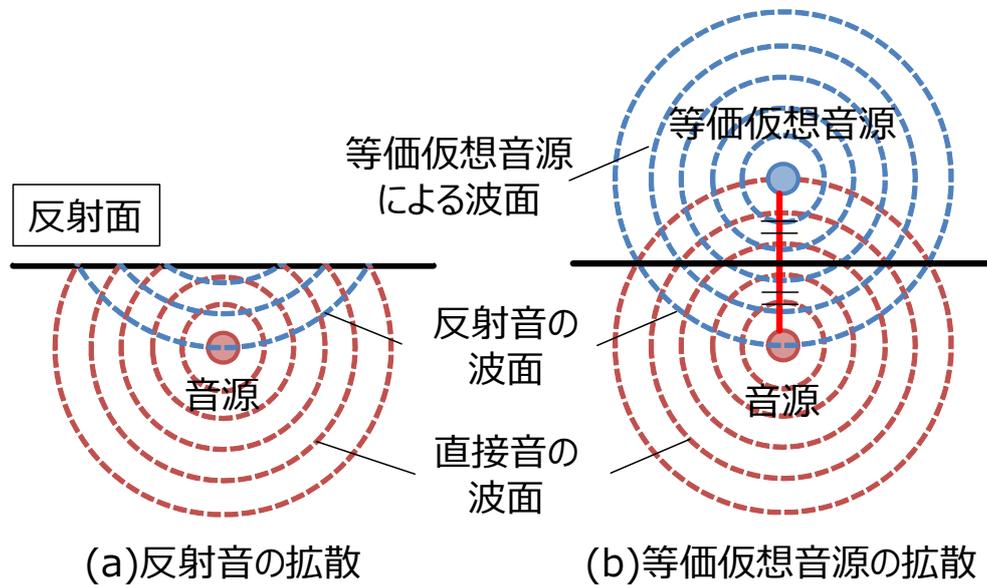


図 4.2: 等価仮想音源による反射

$c$  は音速 [m/s],  $t$  は気温 [°C] を表す.

### 反射

音は伝搬している媒質と性質の異なる媒質との境界にぶつかると、反射を起こす (図 4.1b). その反射角度はスネルの法則に従い、反射音の波面は反射境界を基準に元の音源の鏡面对称の位置に仮想音源を配置したものと一致する (図 4.2). 音像法もしくは鏡像法と呼ばれる手法の音響レイトレーシングに使用されており、複数回の反射による高次の反射音についても同一のルールで適用可能である. つまり、音の反射は新しい信号を作ることなく、反射面に対する鏡像の位置に複数の仮想音源を配置することで表現可能である.

### 回折

音波は障害物と衝突すると、衝突面を新しい波源として障害物の後ろへ回り込む (図 4.1c). 回折の計算は、有限要素法・境界要素法・FDTD法などが一般に使用されるが、いずれも計算負荷が非常に重い. 回折が起

こる状況を考えてみると、音源となる物体が直接見えないことが多いため、MRの効果としての効果が薄いと考えられる。そのため、実装を見送ることにする。ただし、物陰に潜んだ物の存在を回折音を使って知らせることができるというのは、複合現実感の演出として面白いので今後の課題である。

### 減衰

音波は媒質中を球面上に広がっていくが、振幅は音源から距離が離れるほど減少する。単位面積当たりのエネルギーが減衰していくこの現象は、拡散減衰と呼ばれる(図 4.1d)。点音源の場合、

$$A = 20 \log_{10} \frac{r}{r_0} \quad (4.2)$$

で表すことができる。Aは減衰量 [dB]、rは音源との距離 [m]、r<sub>0</sub>は基準音量の距離 [m]である。ただし、音源の形状により減衰関数は異なる。また、音波が障害物にぶつかるとエネルギーの一部が吸収されて音が小さくなる。吸音減衰と呼ばれ、障害物の材質により減衰量が異なる。

### 干渉

音は波動であるため周波数ごとに位相を持ち、同じ場所に2つの音が同時に届くと、それぞれの音波の位相によって強め合いもしくは弱め合いの現象が起こり、これを干渉と呼ぶ(図 4.1e)。2つの音波の単純な和算で計算されるが、正確な位相効果を得るためには鑑賞者の左右の耳の位置で計算する必要があるため実時間で求めることが難しい。また、ヘッドホンアンプやアンプの出力機器においても信号の位相特性が一定しないので、計算通りの位相出力を音波にするためには、デバイスのリバースエンジニアリング的な補正が必要となる[87]。干渉により音波が完全に消える場合などの極端な場合を除いて、位相の正確さは知覚されにくく、計算負荷も高いため本研究では考慮しない事とした。

#### 4.4.2 音響的整合性の検討

上記で確認した音の物理的性質を基に、知覚上、空間を正しく感じるために必要な音響的特性をまとめると、次の要素を考慮する必要があると考えられる。

**時間的整合性** 音速は安定な温度下においては一定であることから、音源とユーザーの間の距離は時間によって表現することができる。そのため、仮想空間中の物体による音源や反射による仮想音源が発する音がユーザーの耳に届くまでの時間を正しく合わせることは、ユーザーの空間知覚のために重要である。

**エネルギー的整合性** 音の大きさは距離によって減衰するため、音源との距離に応じて音の振幅を調整する必要がある。また音が耳に届く経路上に障害物が存在すると音の大きさは減衰するため、振幅の調整により物体の存在を知覚させることができる。

**周波数的整合性** 音の高さは、物体との反射や空気とは異なる媒質の透過などにより変化する。特に、人間の耳や上半身、顔の形状の影響を受けて音が反射や回折を起こすことによって周波数特性が方向ごとに大きく異なって聞こえることが頭部伝達特性として広く知られている。そのため、音源とユーザーとの方向によって周波数特性を変化させることは方向の表現(音像定位)に必要である。

**位相的整合性** 複数の音源が存在するときに、その音源間の位置関係とユーザーの位置によって音の干渉により聞こえ方が複雑に変化する。

これら音の複合現実感に必要と考えられる整合性を高く保つために実装方法を検討していく。本研究では、時間的整合性、エネルギー的整合性、周波数的整合性の実時間処理に注目して実装方法を検討していく。音のMR演出を実時間処理によって行うため、実装が難しく演出効果の薄い位相的整合性の実現方法については今後の課題とする。

#### 4.4.3 音響のインパルス応答モデル

ある一点の聴取点における音の反射モデルは、時間的な表現として図4.3のようにインパルス応答を用いて表される。音源から発せられて環境中で複数回の反射を繰り返し聴取点に到達する音は、直接音・早期反射

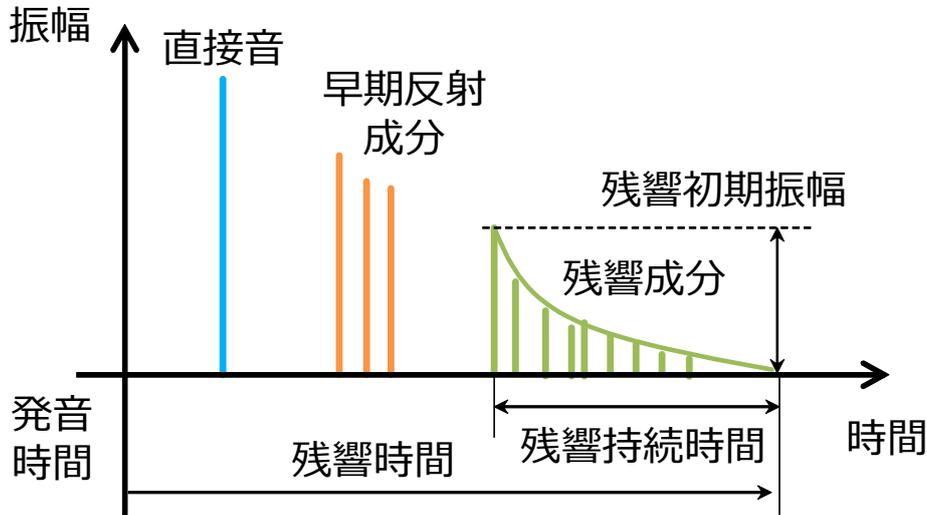


図 4.3: 音響のインパルス応答モデル

成分・残響成分に分けて表される。このうち、音に方向感を与えるのは直接音と早期反射成分であり、残響成分からは方向感が得られにくいことが実験的に知られている。一方、残響成分は大きさと持続時間によって、空間の広さを知覚されることができるとも知られている。

#### 4.4.4 音響の計算

直接音と早期反射成分は音像定位のために有効な成分であり、方向感に強く関与する。残響成分に関しては方向感には影響しないため、振幅の大きさと持続時間のパラメータだけで近似可能である。直接音は、音源とユーザの間の距離が与えられれば、拡散減衰による振幅を計算して遅延時間を計算できる。早期反射成分は、音像法により仮想音源の位置を推定し、仮想音源との距離と遅延を計算し、反射の回数に応じて素材の吸音減衰を乗じて計算できる。

残響成分は、残響初期振幅および残響時間の2つのパラメータを用いて、簡易的にモデルで計算を軽量化する。音響工学において、音源の置かれた空間の幾何形状が分かれば、アイリングの残響式(式 4.3)で残響時間が一意に計算できることが知られている。

$$T_{rend} = \frac{KV}{-S \ln(1 - \alpha)} \quad (4.3)$$

$T_{rend}$  は残響時間 [s],  $K$  は定数 (0.161),  $V$  は空間体積 [ $m^3$ ],  $S$  は空間内表面積 [ $m^2$ ],  $\alpha$  は平均吸収係数 (定数) である. 減衰関数を指数関数的に減少する適当な関数と定めて, 任意の時間の振幅を求められようにし, 残響時間内にランダムにインパルスを分布することで疑似的に残響を計算できる. 例えば,  $T_r$  を残響時間,  $a$  を初期振幅,  $b$  を残響開始時間に係るパラメータとして, 減衰関数を式 4.4 のような形にできる.

$$f(t) = \frac{a}{1+t} + b, (f(0) = 1, f(T_r) = 0) \quad (4.4)$$

このように音響成分を振幅が音量を表すパルス列で表すことができると見なすと, 疑似的ではあるが簡単に計算でき, 出力の計算は音声信号とそれぞれの残響成分のパルス列の畳み込み演算を行うだけでよいことになる. つまり, 残響の生成方法はインパルス応答列を生成することと等価になる.

#### 4.4.5 HRTF による定位感の表現

左右の耳について, それぞれに音の方向に応じた HRTF を掛けることによって, 音に定位感を持たせることができる. この計算は, 通常畳み込み演算によって行われ, 実装では周波数空間での単純な四則演算で表される.

上記の計算はいずれも畳み込み演算で処理できるため, 演算部を単純化することができる. 次節では, ハードウェア構成を述べたのち, 音響処理の実装について述べる.

## 4.5 MR サウンドシステム

### 4.5.1 ハードウェア構成

ユーザーが使用する MR 端末は, 図 4.4 のように計算機と IMU の取り付けられた HMD, およびオープンエアヘッドホンで構成される. 位置は車両に搭載された GPS で計測されて, 計算機へネットワーク配信されている. IMU の出力は, 映像処理と音響処理で共有される. IMU は HMD に取り付けられているので人の顔の向きと連動して, ロール・ピッチ・ヨー角を出力する. バスに乗車しながら MR 体験をすると乗り物酔いしてしまう人が少なからずいるので, ロール角を除いてピッチ・ヨー角を使用し

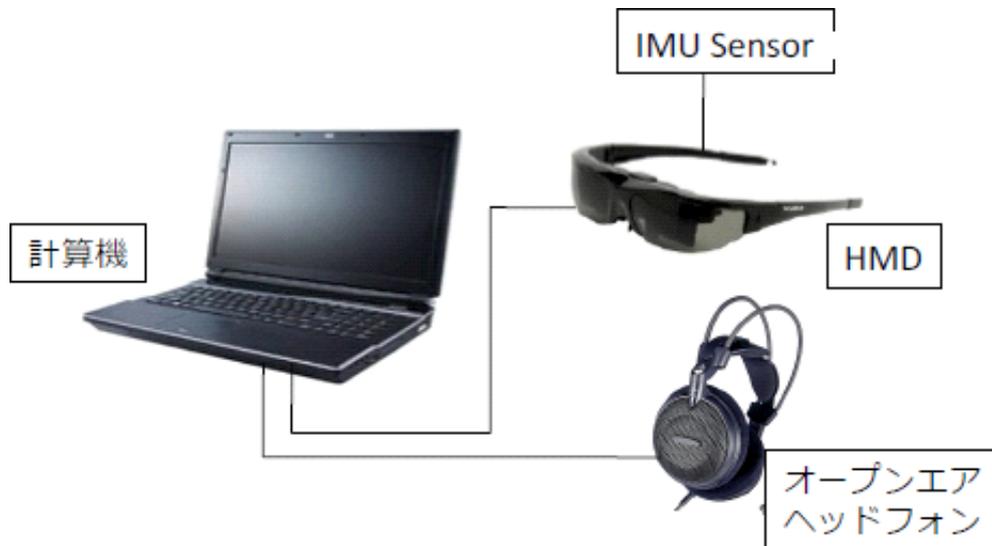


図 4.4: クライアント端末

て乗り物酔いの抑制対策をする。ロール角を省くことで水平方向を安定に保つことができるため、乗り物酔いを大幅に抑えることができる。IMUに内蔵された電子コンパス機能により、東西南北の方位にアラインされた方位を得られるので、モビリティシステムの方向に関わらず方位に合わせてコンテンツを提示できる。

ヘッドホンは、普及価格帯の安価な普通の製品であるが耳が遮断されないオープンエア型を選択している。ユーザの耳に直接外部の自然音が届くことで、計算機を介さないでも自然な複合現実感的な演出ができることを狙ったものである。映像のMRは、モビリティシステムに搭載されたカメラの映像を背景画像として利用するビデオシースルー型を想定しており、HMD自身にはカメラは搭載していない。コンテンツ体験時、視聴者はHMDで視覚を遮断され、ヘッドホンで半分聴覚をふさがれた状態になる。

#### 4.5.2 音響処理

図 4.5 に音響処理の概要を示す。4つのスレッドで分散処理されており、リスナー管理、反射面生成、反射判定、音声信号処理に分けられる。

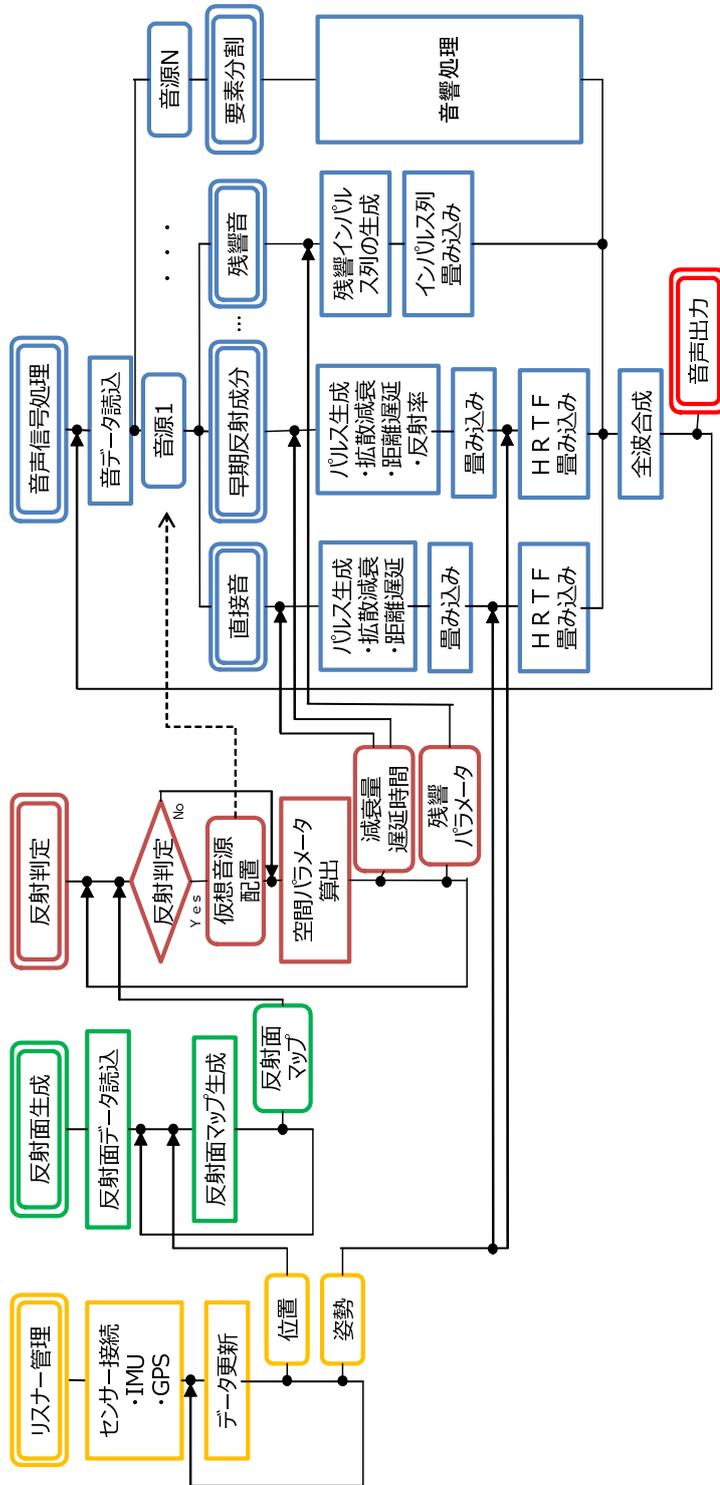


図 4.5: 音響処理のフロー

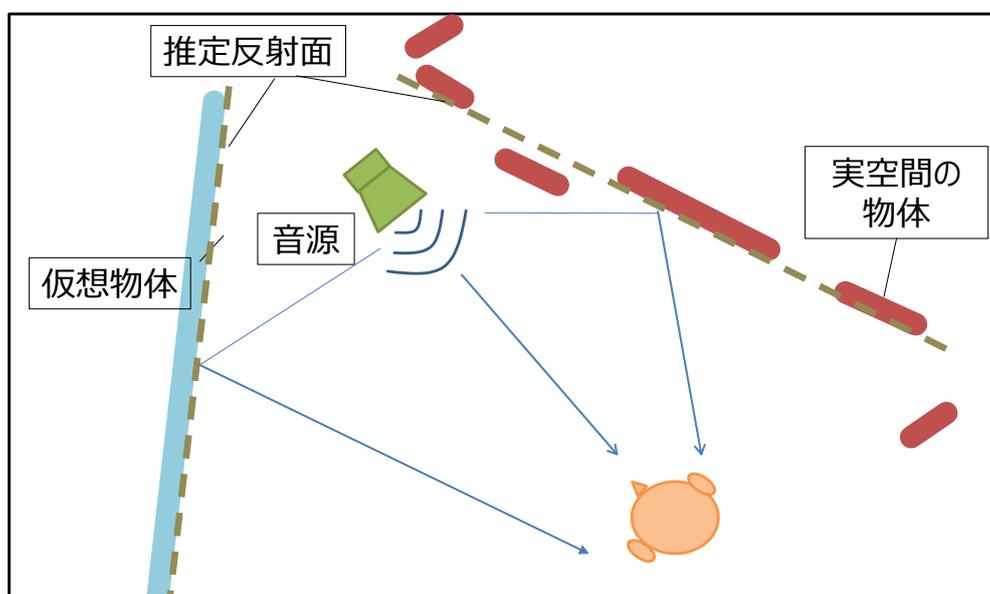


図 4.6: 反射面の推定

### リスナー管理

IMU によりリスナーの姿勢を逐次取得し、GPS によりモビリティシステムの位置情報を取得し、各スレッドに情報を共有する。

### 反射面生成

仮想空間に配置された物体と、実空間に存在する物体の幾何情報を取得し、同一座標系に配置したうえで反射面を推定する。実時間処理のために、空間を2次元の俯瞰図の画像として扱う(図4.6)。実在する物体と仮想的に配置する物体を同一の座標系の仮想空間上へ配置して、画像処理の直線ハフ変換により反射面を推定する。一定以上の長さの直線を形成している障害物を反射面として採用する。吉野ら[80]や檜崎ら[86]は、仮想空間の障害物による反射や遮断の影響は周囲を囲まれるような場合を除いて、効果が限定的であることを報告している。そのため、一定の長さを持った反射面のみを計算対象とした。

## 反射推定

反射面は一つの線分として表され2つの線分の幾何関係から、遮蔽や音像法により仮想音源が配置される。例えば、直接音の遮蔽を計算するためには、音源とリスナーを結んだ線分と反射面の線分の2つの幾何関係式で計算できる。仮想音源の配置は、音像法により反射面を直線とみなした線に音源からの垂線を伸ばし、音源と交点までの反対側の等距離の点に仮想音源を置けばよい。

仮想音源を含む各音源とリスナーとの距離から、減衰量と遅延時間が計算でき、音声信号処理スレッドの直接音と初期反射成分の処理工程に渡される。仮想空間の建造物の空間の幾何形状の概要から、アイリングの式によって残響時間が得られ、音声処理スレッドの残響処理に渡される。

### 4.5.3 音声信号処理

音声信号処理では、一つの音声信号を直接音・早期反射成分・残響音に分けて音響計算を行う。すべての音声信号に対する音響処理結果を加算して音声出力する。入力される音声信号は、予め残響の取り除かれたドライソースである。コンテンツ編集において明示的に与えられた音源と仮想音源は計算過程では同列に扱われて、音源の数だけ並列処理が走る。また、反射面の数と反射の回数によって、早期反射成分のプロセス数は可変する。

直接音と早期反射成分は、距離による遅延および減衰と、HRTFの2段階の畳み込み演算で計算される。残響音は、残響パラメータをもとに生成されたパルス列の一段階の畳み込み演算で計算される。

HRTFは、MIT Media Labが公開しているKEMARダミーヘッドによる測定データマップ[88]を用いて、音源とユーザの相対方位の角度によって畳み込み演算に用いる逐次データを一つ選択する。畳み込み演算は、周波数空間に変換してから行い、SIMDを用いた実装とした。音声信号においては不連続な信号が、高周波成分を含むノイズとなって聞こえてしまう為、音声信号処理は必ず一定時間内に計算を完了する必要がある。そのため、負荷によって高次の早期反射成分や仮想音源の数を調整できるようにした。本実装では、最大24チャンネルの同時処理が限度であった。

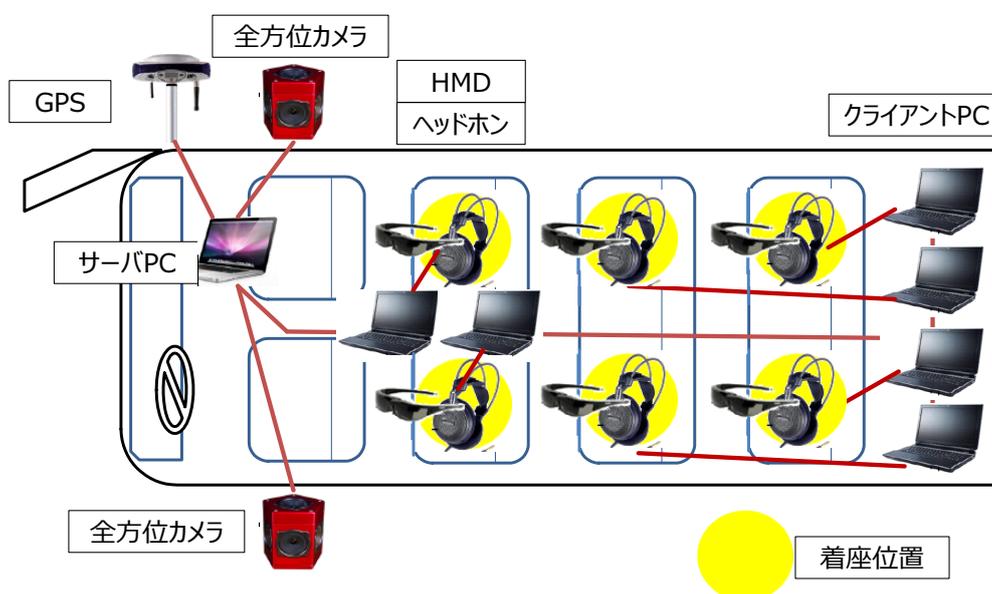


図 4.7: MR モビリティシステムのハードウェア構成

## 4.6 実証実験

### 4.6.1 実験概要

2011年11月3日から5日まで、開発した音響システムを備えたMRモビリティシステムを用いて奈良県高市郡明日香村において、一般の来訪者を対象に実証実験した。

### 4.6.2 使用機器

実験機器を説明する。モビリティシステムのベースは最大11人乗りの小型電気バスで、窓は無いため乗客は外気にさらされている。図4.7に、電気バスに搭載したハードウェアの配置を示す。機器の詳細は表4.1に示す。クライアント端末が6組配置され、ユーザは6名まで乗車できる。サーバPCに、2台の全方位カメラとGPSが接続されて、位置情報と全天球画像がネットワーク経由でクライアントPCに配信されている。クライアント端末が6組配置され、ユーザは6名まで乗車できる。サーバPCに、2台の全方位カメラとGPSが接続されて、位置情報と全天球画像がネットワーク経由でクライアントPCに配信されている。ユーザは、

表 4.1: MR 音響システム使用機器

品目	メーカー	型番
ヘッドホン	オーディオテクニカ	ATH-AD300
HMD	VUZIX	Wrap1200VR
計算機	SONY	VPCZ1 (Core i5-520M 2.4GHz, 8GB)
サーバ PC	APPLE	MacBook Pro (Core i7-2620M 2.7GHz, 4GB)
GPS	Trimble	Trimble 5700o

電気バスに乗車して HMD とヘッドホンを掛けて、走行中に自由な方向を眺める。電気バスが低速走行するので走行音はほとんど聞こえない。

### 4.6.3 実験設定

図 4.8 に走行ルートを示す。発掘情報を基に復元された古代飛鳥時代の建造物を重ねた地図になっている。公園整備されている伝飛鳥板蓋宮跡から出発し、時速 3km 程の速度で北に位置する飛鳥寺まで向かう。

現在は田園風景であるが、かつて天皇の宮があった都であった場所とされていて、復元建物は当時の宮殿が主である。経路は、小屋がわずかに建つのみで、対向車などの動的な障害物もほとんど存在しない。そのため、音響の障害物処理は実時間で行う必要が無く静的な障害物データと仮想復元の建物データを使用して、事前に疑似音源マップを制作して使用した。音環境は、周囲に民家などの建造物はほぼ無いが、無音というわけではなく、耳を澄ますと虫や鳥の鳴き声・小川の流れる音・鐘の音、風の吹き抜ける音などが聞こえる。

### 4.6.4 コンテンツ

この地は、西暦 645 年に起きた乙巳の変として知られる蘇我入鹿暗殺事件をモチーフにして、ストーリー仕立ての全方位映像と音声による MR コンテンツを作成した。映像は、全方位カメラで撮影される現在の風景と、発掘情報をもとに製作された当時の街並みの CAD モデルと、実写映



図 4.8: 音源マップ

像から切り出した人物モデルを合成表示した。GPS から得られる位置情報によって仮想空間内のユーザ位置を同期して更新し、幾何関係を合わせる。

音については、音源を図 4.8 のように配置した。GPS を用いて位置情報を得て、バス周囲に存在する音源と反射面をもとに生成した仮想音源をサンプリングして音場を計算した。発掘調査から、往時の建物の配置と種別が分かっており、その推定に基づいて音源の特性情報を割り振った。音源は、ユーザと音源の相対幾何関係から音響効果が与えられる音のほか、音響効果を与えられないナレーションと場面転換の効果音で構成される。ナレーションは、女性の声で子供に読み聞かせるような演出として、広い年代に聞き取りやすいようにした。転換時には、音源とユーザ位置の相対距離に応じて、フェードイン／フェードアウトのように滑らかな変化の効果を与えた。

バスの進行に応じて、7つの場面が進展していく。概略を以下に示す。

### シーン 1：導入部

実際の風景から MR へ移行する。

映像：役人や女官・兵士などの日常風景

音：ナレーションと鳥の鳴き声などの環境音。とくに環境音は、現在の明日香で日常的に聞こえてくる音と類似した音源を配置。

### シーン 2：飛鳥時代・飛鳥京の紹介

飛鳥浄御原宮と呼ばれた宮殿の正殿を再現して示す。

映像：役人や女官・舎人が仕事をする日常風景

音：ナレーションと人の話し声

### シーン 3：人物登場

乙巳の変の主要人物である中大兄皇子・中臣鎌足・蘇我入鹿と思しき人たちが儀式のために宮へ向かう場面を示す。

映像：高級貴族とその付き人が歩いている。

音：少し大きい足音。人物が多い割に話し声が少なく足音が大きく響いて聞こえるような演出にして、事件の前の緊張感を煽る。

#### シーン 4：異変発生

群衆がざわつき異変を知らせる。

映像：人々の慌ただしい様子や戦闘の場面

音：舎人の悲鳴や走る音，剣戟の音

#### シーン 5：蘇我入鹿暗殺

場面転換し，蘇我の入鹿暗殺の様子を示す。

映像：物陰から飛び出た二人の人物が文を読み上げる人物に襲い掛かる

音：剣戟の音・うめき声・激しい雨の音が聞こえる。ナレーションで，現在の場所から 1km ほど離れた「入鹿の首塚」と呼ばれる場所まで入鹿の首が飛んで行ったという伝説があることを伝える。

#### シーン 6：兵士集結，大化の改新へ

入鹿暗殺後，蘇我氏の勢力を討伐するために飛鳥寺に軍勢が集結したという史実の場面を示す。

映像：古代の雄大な飛鳥寺に向けて兵士たちが行進する場面。カメラで撮影される実風景には蘇我氏の邸宅があったとされる甘樫丘がすぐ近くに見える。

音：軍勢の歩いている音

#### シーン 7：結び

MR から現実の風景に戻り，現存する史跡を紹介する。

映像：現実の風景のみ。西側には入鹿の首塚。

音：飛鳥寺に実際に設置されている鐘の音を遠くに配置。その鐘は観光客が自由に衝くことができるため，しばしば本物の音も聞こえてくる。

現実世界で実際に聞こえてくることがあり得る音を重ねて，類似の鳥や虫の声，鐘の音などの環境音を配置すると，ユーザは現実世界なのか仮想世界なのか正しく判断できずに，すべての音が仮想空間から聞こえてくるような MR コンテンツの中に入り込んだ錯覚を覚えることがある。オープンエアヘッドホンを使用して，意図的にそのような演出をしている。



図 4.9: 実証実験の様子

#### 4.6.5 実験

図 4.9 に、実証実験の時の様子を示す。一般の来訪者 139 名に MR 体験をしてもらった後に、音響システムの効果をアンケート調査し、主観評価を行った。男女比率は、男性 52 男女比はほぼ等しく、幅広い年齢層に体験してもらうことができた。

アンケートの回答は、“1. とてもそう思う”、“2. そう思う”、“3. どちらでもない”、“4. そう思わない”、“5. 全くそう思わない”の 5 段階評価で、次の 4 項目を選択してもらった。

1. 本システムでの音声に対する満足度  
本手法がエンターテインメント性やストーリー性に寄与したかを検証。  
[質問] 今回のシステムでの音声を楽しめましたか。
2. 本手法で生成された音響要素に関する認識度  
本手法で生成された反射や残響といった要素に気づいたかどうかを検証  
[質問] 今回のシステムでは音の反射や響きを反映しましたが、違いに気づきましたか。
3. 本手法による臨場感に関する調査  
本手法によって臨場感を感じる事が出来たを検証

[質問] 音の聞こえ方によって、自分がその場にいるかのように感じましたか。

#### 4. 内容理解度の向上に関する調査

コンテンツの内容理解に本手法が効果を挙げたか検証

[質問] 音が左から聴こえてくる、右から聴こえてくるといったことによって、内容の理解がより深まったと思いますか。

### 4.6.6 実験結果・考察

図 4.10 に、アンケート結果を示す。

(1) 本システムでの音声に対する満足度の調査では、“とてもそう思う”、“そう思う”という肯定的な意見を答えた被験者は全体の 93 % であり、“全くそう思わない”という回答は無かった。大多数の参加者が、本実験の音声コンテンツを面白く感じていると分かった。

(2) 本手法で生成された要素に関する認識度の調査では、肯定的な意見は全体の 62 % であった。6 割以上の参加者に本手法で生成された反射や残響の存在が伝わったと分かった。

(3) 本手法による臨場感に関する調査では、肯定的な意見が全体の 69 % であった。7 割近くの参加者が普通の音響とは違う臨場感を感じられたと言える。

(4) 内容理解度の向上に関する調査では、肯定的な意見が 66 % であった。空間情報を持った音声映像とともに提示されることで、コンテンツの理解度が上がることが分かった。

第 3 章の評価においても問題となったのと同様に、一般の観光客を対象とした本運用において定量的なシステムの比較評価が難しいという問題がある。そこで自由記入欄に記された主観的なコメントを重視し、注意深く分析していきたい。回答の内容は音に限らない。

- 今後も続けて開発して下さい
- 画像がいまいち
- 場所によってヘッドホン、HMD を外してリアルを見る
- ゴーグルの視度調整ができるようにしてほしい、画像の鮮明度を上げて欲しい（画像のサイズがもう少し大きい方が良い、HMD とヘッドホンは一体化すべき、寺のパースが風景と合っていなかった

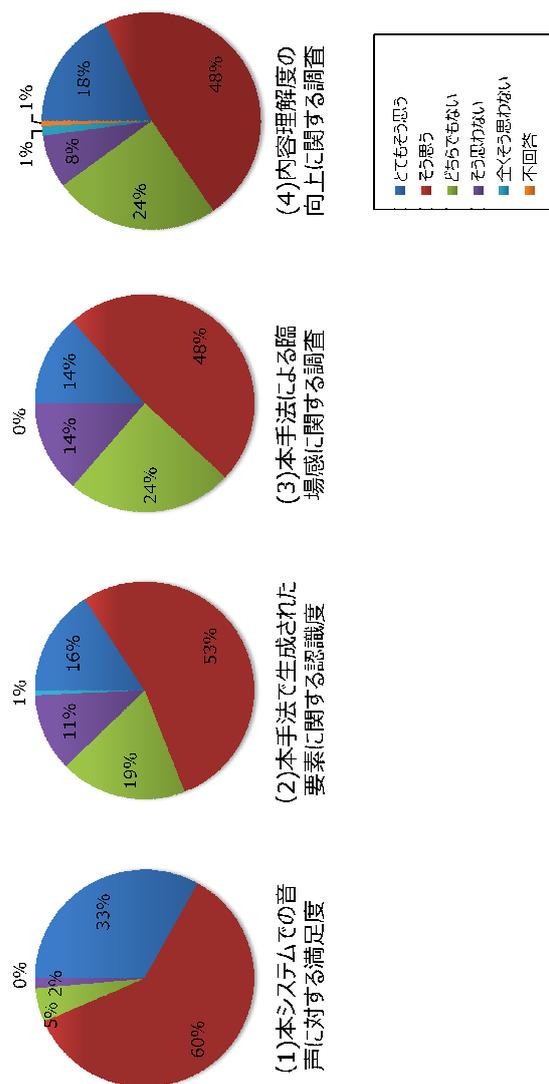


図 4.10: アンケート結果

- 景色がよく見えないので自分がその場にいるように思えなかった（音では難しい）
- 他の都市で実験を行う予定はあるのでしょうか
- 少し気持ち悪くなったけど、実感できて楽しかった。歴史音痴な私でも楽しめました
- 今後のバーチャルに期待します
- もう少しゆっくり見たかった、感動しました
- 過去と現代を重ね合わせる方法と、完全に過去の風景にするというのでもよいかもしれません（少し車酔いしたので）
- 最近こういったシステムが増加しているのでより高度化を希望します
- 映像が音声に合っていない所があったので改良されたらもっとすばらしいものになると思います
- バーチャルの鮮明度が不満でした（レスポンスビリティの不足でしょう）、この分野でも Japan as number one を希望します。not two.
- 車酔いしました。映像と音が少しずれたように思います。音はしても人が入って来なかったり。
- 面白い企画だと思う。初めての体験でした。子供たちが楽しめそうです
- 電動自動車とのコラボは面白く感じ、いろいろ考えられるのでは
- 実際の映像が出てませんでした
- 周りの実際の建物が気になった、ない方がいいと思う
- 音響の工夫でもっと臨場感が出せるのではないのでしょうか
- 画面にCG部分が多いとバーチャル感ももう一つなのでもっと背景が生かせるとうれしいけど現実には現代的すぎますね
- 宮殿の中を通り抜けるようで楽しかった

- このシステムはどういうしくみなんですか？
- 面白かった
- 画像が揺れて少し気持が悪いです
- すごい楽しかった，でも酔いました
- 映像を気にするあまり，音をあまり気にしていませんでした．実用化が楽しみです
- 早く実用化して欲しい
- 現地での空気感と VR の組み合わせ (MR) が新しい，観光資源の可能性を感じました
- 大変貴重な体験ができました，ありがとうございます．映像の完成度はまだまだだと思いますが，観光事業に実用できるよう頑張ってください
- 実験に参加できてよかったです．将来楽しみにしています
- 人物，刃物の音に加え，風・水の音響効果が加わらないか？
- これからも頑張ってください
- 現実世界を見たいときメガネを外したが，液晶透過モード可にしてほしい，説明で右を見て欲しいというとき，液晶画面にポイントを表示して欲しい
- 現実風景との重ね合わせの工夫（見分けコントロール可能に），バーチャル画像の揺れ帽子
- ゴーグルがもっと軽いといいです
- 不思議な体験をさせていただきありがとうございました．感動しました
- 人物像の動きが見にくい．鮮明に映し出して欲しい
- 昔の風景と今の風景の切り替えを個人個人でできたら理解しやすいと思いました

- もう少し詳しくお願いします
- 画像の建物が空中に浮いたように見える時がある
- 壁を突き抜ける，音声と画像のずれ，地平面のずれ，フレームレートが気になる
- 現実と CG の融合が難しそうですが…今後の研究に期待します
- 案内の仕方が新しさがいいかな．楽しかったです．音より画像に気を取られた
- ミラーが気になりなかなか入り込めなかった．外の風景が完全にシャットアウトされ臨場感に欠けました．ただ技術としては可能性のあるものと思います
- 映像がもっとはっきり見えたらうれしい
- 解像度が上がるとより魅力的ですね
- 実写と CG との融合があまり実感できない
- メガネが少し大きかった．今の映像と CG が重なると少し変な感じがしました
- 車の揺れが少し気になりました
- 宮の配置と現在の地図（車のルート）があればどのへんを通ったかわかりやすいかも
- 器具が重々しい．広範囲がクリアに見えると良いと思う
- 明日香はもう少しアピールが必要だと思う
- 楽しかった．得した気分
- ありがとうございます
- 自動車の動いているところと現在の場所関係をもう少しよく知りたい．映像をはっきり見たい
- 機会があればまた是非に体験したい

- ありがとうございます
- 広いエリアのどこにいるか、どこに行くかをあらかじめ説明があればもっと理解しやすいように思う
- 初めての体験で面白かった。実際には見られないことをその現場で体験できるのがすごい
- もう少し時間を長くできますか
- とても楽しく見たい聞いたりできました。人物をもう少しリアルにできたらと思います（カツラなど）
- 俯瞰の映像を織り交ぜるといいのでは？
- 音の臨場感があったが、飛鳥京の再現がいまいち。現在の位置ときちんとリンクしていない。
- 遊園地ならトラムだろーけど、トラムなしでもいいのかも？
- 実際の映像とバーチャル映像の混ざり具合が任意に操作できればいいと思う。
- 遺跡が点在するなら中部地域にとって魅力的な技術だと思う。
- 3D化も検討して下さい。酔いやすかったです。
- ただ少しぼんやりしていた気がした。もう少しはっきりしていれば完成度は高い
- リアルに当時の様子が伝わってきて面白かったです。CG技術の素晴らしさを実感できました
- 音が立体的に聞こえてくるので、臨場感にあふれていました。
- 左右を見ようと頭を振り過ぎると少し気分が悪くなる
- 景色に合わせて登場人物の衣装もあっていました。できれば髪型も…
- 自動車で移動は別の意味で楽しいのですが、実際の建物群の位置などが逆にわかりにくい気がしました。建物内を突っ切るのには少々驚きましたが…

- 映像がもう少し綺麗に見えたらいいと思います。
- もっとリアリティが出せたらもっと良くなる。バーチャルと今の風景が一切ダブっていたのが良くない
- とても楽しかった。
- 全部が昔の街になっているもの。
- コンテンツの作りこみが上手だと思いました。
- とてもユニークな企画だと思う。
- 少しはつきり見えにくかった。よく聞こえました。
- 音が大きすぎる。少し酔ってしまった。
- 頑張ってください。
- 老眼に加え、裸眼では少しピンぼけ
- 貴重な体験でした。このような形で一般に広めて行って下さい。
- もっともっと進化させて色々と魅せて下さい。
- 解説もあって分かりやすかった。
- 画面が音声と異なる時がたまにあった。
- 乗り物酔いしそうなので改善して欲しい。
- 壁や柵、垣かいの中をすり抜けてた。少し信号がずれている気がする。大極殿の様子が見たい。
- 現実感のある世界が迫るようなものであって欲しいです
- ヘッドホンなどを付けずに見られるなら見てみたいと思います
- 今回はこの実験を楽しみに、こちらまで来たので、とてもよかったです。
- 移動しながらバーチャル体験が素晴らしいと思います。
- バックの建物の違和感

コメント総数に対して音に関する言及は多くなかったが、音に対する不満が少なかったことを反映していると考えられる。しかしながら音の品質向上に対して、映像の不鮮明さや実写とCGの整合性の不一致など映像に対する不満が多く挙げられていた。映像と音の示す位置関係やクオリティが均衡していないと違和感を与えてしまうとい仮説が考えられる。また、移動しながらHMDやヘッドホンを使ったMR鑑賞により、車酔いを感じる人が少なくなかった。この原因は、視覚と聴覚をデバイスに遮断されることと、MR合成された映像や音の整合性が正しくとれていない場合があること、フレームレートが低い事が考えられる。車酔いは体験者の体質によるところも大きいので、車酔いしやすい人のためにHMDとヘッドホンを使ったシステムだけではなく、タブレット端末のように感覚を遮蔽しないシステムの開発の必要性もあると考えられる。また、整合性の精度向上やフレームレートの向上は引き続き開発していく必要がある。企画運営に関しては、楽しかったという感想が多く寄せられており、実用化を望む声も多かった。提案システムの観光応用への有効性を示している。

アンケート結果からは、参加者は概ね本手法によって生成された音声コンテンツに満足していたことが見て取ることができた。実験の性質上、同一の参加者に複数回の試行ができないため被験者の主観評価であり、また多くの被験者はMR体験そのものが初めての経験であり、甘目の採点である可能性は残る。しかし、意見者の概ね満足だという回答は、MRの演出がユーザの満足度を向上するための一助となることを示しており、VR/MRの観光応用のためには重要な知見である。

#### 4.6.7 前年度のシステムとの比較

前年度、平城京における施行 [78] の際に行った自由記入のユーザーアンケートでは、音声に関しての改善提案が多く寄せられていた。平城京でのシステムは、本研究の物とは映像提示に関しては同じであるが、音についてはトラムに固定したラウドスピーカーを通して3次元音響ライブラリ OpenAL [89] を用いた簡易空間音響効果を加えたナレーションや効果音を乗客全員に提示するというものであった。またアンケートの質問は音声に特化したものではなく、「復元CG映像にどのような機能や情報を追加すれば、より良い展示になると思いますか？思いついたアイデア

がありましたら、ご自由にお書きください。」であった。下記にその中で音に関する言及のあったものの抜粋を示す。

- その時代の役人や衣装を着た人が解説に登場してしゃべってくれる。アイデアではないがゴーグルが重くて手で押さえないと落ちてしまうのが困りました。
- 映像より声の方が遅いように思った。流れた後に説明があった。
- もっとワイドな画面で迫力が欲しい。音声がかえるともっと臨場感がある。もう少し時間を長く。
- もう少し画面が大きく見やすくなればいいと思います。あと音、馬が走るときの音とかあっても部分的に臨場感が出てくると思います。
- 登場人物にクローズアップしてその人が日常の生活や困っていること、嬉しいことなどを語る。衣服の細かい説明や食生活についても触れる。
- 音が入ると現実感が出ると思います
- 音声(実際に通行人の会話など)があるとより実感できるように思います。メガネの上にかける場合、もう少し配慮が必要かもと思いました。
- 例えば馬の走る音など、映像と一致した音
- 大きな動きと音の追加。機械の縮小化。
- 音楽、BGMなどももう少しアレンジしてほしい。時代の流れの中に生きている自分を実感できました。ありがとう！
- 1. 車内の私語が多いので専用イヤホンが必要。2. 城外の情景も少しのぞければ better
- 画面が少し小さい。音声で説明するのはわずらわしい。自由に眺めたかった。
- 声(話)もう少し長く見たい
- 音声で指示したものに矢印とか付けてほしい(何処にあるかわかりにくいものがあつた)。メガネもう少しかけやすいほうが良い。

- 映像に合わせた音をリアルに
- 音もあると良いですね
- 当時の音とかも取り入れたら良いかも。
- 映像とアナウンスをきちんと合わせる!!
- とても良かったです。あっという間に終わりました。馬の駆ける音とか、音があるとよかったです。あと人物の話し声とか、どんな言葉でまたどんなスピードで話していたとか、平城京の人々に興味はつきません。
- 人が話しかけてきたりすると面白いと思った。現場の音（SE）があると臨場感が増すと思う。
- 自動音声解説，文字情報の表示の活用，登場人物の大写しとカメラワークをゆっくりと動かして欲しい。映像シーンの数を増やして欲しい。
- 説明の音が小さく聞こえなかった。
- 1部説明が聞き取りにくいところがあった。イヤホンなどで聞けるように。
- 音声（馬が走る音など），3D立体映像
- 音声が目元で聴こえた方がリアル。動き（実像）がもう少しなめらかなほうがいい。
- 高齢者の方も多いと思われるので，もう少し，音声，映像等を大きく？
- 色階。小画面と音声が高い途中から音楽が大きく入り何の事が意味不明。と思ったら終了です。との事。何？物足りない感じ。
- もう少し時間をとってほしかった。音楽等の迫力があれば良い
- 見る方を言ってください。
- 音声がききとりづらかったのでイヤホンがほしい。メガネをもうすこし安定にはめられるようにしてほしいです。

- 文字情報，説明の追加．鳥や犬などの動物．木や花のそよぎ
- めがねをかければ音声がきこえてくれば良いのに．もう少しはっきり見えると良いのに？
- 都人の仕事や役目がもっと解ると良いと思います．音声もGoogleから聞こえたらおもしろいと思います．
- 音楽の音でアナウンスの音が聞こえにくいところがあった
- バックの音楽がでかすぎ説明が聞きとりにくい
- 映像と音声とのマッチがうまくいってないところもありました．更なる開発に期待します．
- 当時の会話（話声）や音も聞こえるようにする．動きも活動的に．トラムが振動すると画像が見にくいので改良してほしいです．
- どういう話し方をしているのか，話し言葉が聞けたらと思いました．
- 自分が見たいと思ったところにズームアップできるようなシステム．登場人物が直接話しかけるようなこと．もっと詳しい内容．
- 時間が短すぎるのももう少し長く，またガイドがもう少し早く解説があればなおスピーディーに見れたと思う．
- 音響を一考してみたら？
- 花や季節感の感じられるもの．当時の歌や音楽などの音声の情報．
- 音が入れば良いと思います．（馬の蹄の音や，衛兵の掛け声など）
- 当時の人の声や音を迫力にすればよいと思います．
- トラムが時々揺れて映像が見にくかった．音声が聞き取りにくかった
- 広い範囲を体験できたのはトラムの長所だと思います．一方で近鉄の踏み切りの音が聞こえたりで，没入感は足りなかったように感じました．
- 音声の追加（ナレーションに付け加えて）
- 音声

- (音声機能) 人物モデルがこちらに話しかけてくれるとたのしい。古代の言葉で、古代の食べ物をすすめてくれたり...
- ヘッドフォン。横ばっかり向かせて首が痛いので何か工夫して。
- もっとリアルな感じに。その時代の言葉づかいで話している人を入れる。天皇たちの暮らしぶりが見たい。
- 登場人物の声
- 当時を想定した音声も加えると良い
- 当時の音が聞こえたらいいなと思いました。
- 個々の人々の声が聞けたら良いなあとと思った。(話し声等です。)
- どんな会話をしているか、声が聞いてみたい
- メガネを使用しているのでゴーグルがもう少し大きいとうれしい。画面に音楽などの効果があると臨場感が増すと思います。
- バックグラウンド音楽。でもこの辺がlimitか？
- 電車や声が音声と重なり気になる
- 映像と案内が一致しない(早い)よくわからない。
- ただテレビなどでみるよりはイメージしやすい。でも現実の音は聞こえるし、他のお客様から丸見えではずかしー
- 会場のアナウンスとトラムのアナウンスがかぶって聞こえにくかったです。実際の会場を動きながら見られるのはいいと思います。ゴーグルがかけにくかったです。
- もう少し、人々の活気のある声、雑踏を加えてくれたら臨場感が出ると思います。遣唐使船で公開している映像と合体してくれれば、すごく良いと思います。
- 音楽が高すぎて説明の音が聞き取れなかった。
- 説明を映像の中の人があると面白いと思う

- 大極殿内にも人物モデルを登場させる。競争馬シーンなどに音声を加える。映像がよりクリアになればさらに臨場感を増すように思われます。
- もう少し事前に歴史的な説明があつてから”体験”の方がより深い体験になって楽しめたかとも思います。
- 競技をする人たちの声も表現されていればさらに臨場感があると思う。メガネが大きすぎて固定しにくかった。
- 音楽を入れたらと思いました。
- 大変意義深い体験をさせていただきました。ただ人物、建造物などをもう少しリアリティがあればと思います。犬なんかも登場させる。音なども少し有った方が。あまり贅沢いってすみません。
- 人物が時にはアップになり、その時代の言葉でしゃべる場面も聞きたいです。
- 音が入ったらよい。人の会話の様子など。
- イヤホンからの同時説明
- 楽器の演奏に合わせた音楽など。天皇が出てくるところが見てみたい。トラムが一定の速さなので太極殿では、ゆっくり走るなどの工夫があればよいと思う。
- 人の会話や馬のいななき等、音が入るとよりよいと思いました。このような体験は初めてですので、ありがとうございました。スタッフの皆様方がご親切で気持ち良かったです。
- 音があればよいと思う。
- 人物の声、会話など
- 悪い点：外部の人の声などの雑音が聞こえて集中できない。
- 放送の音が聞きづらい

平城京ではトラムに取り付けたラウドスピーカーから音を出しているため、音響がユーザー個人の位置・姿勢に対応できず、ユーザーが映像と音の不一致を感じるが多かった。また、スピーカーの音と外部からの音の音量差が無いために、集中をそがれるといった声が寄せられた。コンテンツに登場する人物に合わせた効果音の演出をしていたにもかかわらず、音量と音響がユーザーの見ている映像と一致しなかったために気づかれないという問題が多かった。

本研究では、ユーザー個人ごとの位置姿勢に応じて音響を生成したため、臨場感の向上を達成することができた。オープンエアヘッドホンを用いたことで、外部音は聞こえるものの自然な減衰が与えられ外部ノイズが集中をそぐといった問題は起こらなかった。本研究では、音量と方向感をユーザーの見ている映像に合わせて提示できたために、演出に気づかれないということはなく映像の認識理解を向上させることができた。

## 4.7 まとめ

本研究では、MR モビリティシステムのためのサウンドシステムを開発した。広域を移動しながらイベント仕立てで鑑賞する MR コンテンツを作成し、一般の観光客に体験してもらった後アンケート調査を行い、本システムの観光応用への可能性を調べた。小電力と実時間処理のために簡単化した音響モデルと計算方法を採用した。残響をインパルス応答列のみで表し、HRTF の適用とともに畳み込み演算のみで音声信号を処理できるように工夫した。仮想空間と実空間の障害物を仮想空間の同一座標系に取り込み、反射を 2次元のみに限定して、画像処理により反射面を推定した。音像法で仮想音源を配置し、パルス応答列と音源方向のモデルを取得できるようにした。実験のために、大化の改新を題材としたコンテンツを制作した。MR モビリティシステムに搭載した HMD とオープンエア型ヘッドホンを用いて、奈良県高市郡明日香村にて一般の観光客を募り実証実験を行い効果を検証したところ、良好な結果を得た。本研究の実験により、移動しながら鑑賞するストーリー仕立ての MR コンテンツにおいて、音響は演出の重要な役割を担うことが確認できた。アンケートに自由記入形式で寄せられた今後のニーズに関する調査結果を付録に示す。大枠として、歴史系と非歴史系のコンテンツに大別することができた。

実証実験の場である明日香村は、「鳥の鳴き声，小川の流れる音，鐘の音」などの小さな音が聞こえるだけの静かな環境であり，コンテンツに望ましい音だけが存在する環境を期待することができた．しかし，望まない音が日常的に鳴り響く環境も少なくない．そのようなノイズのある場所に本システムを導入する際の一般的な課題について検討していきたい．歴史系コンテンツに本システムを適用する場合，静かな場所での音響コンテンツの構築は容易である．例えば，日本最古の水時計施設であった水落遺跡では訪問客も少なく静かなので，水の流れ落ちる音や一帯に時を知らせる金が鳴り響く様子などの演出がしやすい．一方，京都や平城宮跡のように現在は市街区にある場所では人や車が多く，静けさで演出される荘厳な風景を再現することは困難であるため，本システムによる演出が制限される．戦乱などの大きな音量のイベントや，坂本龍馬暗殺など一瞬の出来事であれば，現在の周囲音の影響が少ないので演出できる可能性がある．音のMRにおいて現実と仮想の複合度のようなパラメータはまだ定義されていない．しかし，仮想空間に向けられる意識が高い演出では，周囲の環境に関わらず適用可能なコンテンツは広がる．現実と仮想の複合度の調整方法と制御方法は，今後の研究課題である．

また非歴史系コンテンツへの適用としても需要を見込むことができる．火災体験のMRコンテンツを作るとすれば，現在の風景の音に延焼音や，物が崩れる音，さらに崩れた物による音響の変化の演出による臨場感の向上を提供することができる．このように，現在の状況に変化を加える音のMR演出も多くの適用先を考えることができる．

また実験では，ユーザがHMDやヘッドホンで視聴覚を制限された状況になると，鑑賞者の感覚変化が見られ，オープンエア型ヘッドホンの外から漏れ聞こえる小さな外部音に神経を鋭くして聞くようになり，些細な音が大きく聞こえるような感覚になることがあることが分かった．実験の経路上に実際に小川があり，その水音が聞こえてくるのだが，「コンテンツとして配置された小川の仮想音源のように感じて，どこから聞こえてくるのかを探してしまった」などのコメントが寄せられた．この現象の物理的な考察は十分にできていないが，耳に遮蔽物をかぶせると音響的にはローカットフィルタのように働く傾向があり，相対的に高い周波数の音がよく聞こえてくることに関連するのではないかと考えられ，興味深い．

本研究で示した手法は，計算リソースの制限から古典的な音響処理手法の延長線上のものであり，MRコンテンツの演出としての効果は十分に

認められたものの、音響モデルが簡単すぎるため物理的に正しくない。計算コストの制限から、パーティクルで存在するべき群衆や軍勢のような音源の表現も一点の音源として計算するようにしているが、複数の音源として扱った方が望ましい結果が得られる。GPUの進歩により並列計算機の性能が飛躍的に高まっており、FDTD法 [85] のような重い計算モデルが実時間で処理できるようになるかもしれない。正確な音響を計算できるようになれば、音の複合現実感の演出の可能性がもっと広がることと思う。

## 付録: 今後のニーズに関する調査結果

### 歴史系:

- 都市・遺跡に関するもの  
平城宮跡, 水落遺跡, 唐古遺跡, 大仏建立, 開眼式, 寺院内部, 京都
- 時代に関するもの  
平安, 安土桃山合戦場跡地, 幕末一鳥羽・伏見の戦い, 弥生一日常生活・儀式や踊り, 戦国時代の合戦の様子
- 故事に関するもの  
応仁の乱, 坂本龍馬暗殺, 本能寺の変, 天皇の即位式

### 非歴史系:

- 自然に関するもの  
森林内部の散策, 地中や上空など自然ではいけない場所, 川のせせらぎ
- その他  
火災の様子, 恐竜時代, バーチャルなりラクゼーション, スポーツ観戦, 海外旅行, 古代の人との会話

## 第5章 発掘情報に基づく遺跡風景の仮想復元手法

### 5.1 はじめに

遺跡の仮想復元のために、高品質なモデリング手法が必要とされている。仮想復元を用いた展示は、ヘッドマウントディスプレイやスマートフォンを用いて、過去に実在した建物や人物などを現在の風景を借景して重ねて提示できる。図5.1は、遺跡の仮想復元の一例である。建造物は考古学的知見に基づいたCGモデリングによって比較的精巧に再構成されているのに対し、背景である石敷きは簡単なテクスチャを使って構成されているため現実感に乏しい。MRは実際の風景と重ね合わせて鑑賞するので、CGテクスチャの現実感の高さが重要になる。

現実感のある復元展示のためには、背景のような細部にも発掘情報を活用することが望ましい。日本では古来木造建築が主流であったため建物が現存していない遺跡が多いが、石敷きなどの一部分は現存している例も多い。このような遺跡の仮想復元では、現存物の発掘情報に基づいたモデリングによって現実感の高い復元モデルを生成することができる。しかし、遺跡が完全な状態で現存していることは少なく、大半の部分が失われていることが多い。そのため、現存していない部分の仮想復元をするために、元の形状の特徴や分布を保持しながら形状を整形する手法が必要とされる。

また細部の品質に関する問題の原因として、背景のように場面の主としない物体の復元には、金銭的・時間的コストが掛けづらいという問題がある。各地の遺跡では考古学的に新しい発見がしばしば報告されている。それに伴い復元想像図が更新されることになるが、合わせて高頻度で仮想復元のコンテンツも更新することが望ましい。コンテンツ編集の手軽さは、コスト削減につながり、高頻度のコンテンツ更新を可能にするために重要である。

背景の中でも、建築物の基本構造を知ることができる石敷きの再現は



図 5.1: 遺跡の仮想復元風景の一例

特に重要である。例えば飛鳥京では、近年、飛鳥京苑池の発掘調査により石組みの庭園跡が発見され、庭園の規模や造成技術が当時の文化水準の高さを伝えている。また、飛鳥寺西方遺跡では小さな石で敷き詰められた広場跡が発見されており、中大兄王子と中臣鎌足が蹴鞠の最中に出会った歴史的な場所である槻木広場のものと見られている [90]。

## 5.2 目的

発掘された石敷きを基に、石の分布のボロノイ図表現を用いて簡単に編集できるようにし、個別の石の形状表現に陰関数表現を用いて形状を再構成して、石敷きを再構成する方法を提案する。陰関数により表された曲面を用いた形状の表現形式が知られている。その一つである多項式陰関数表現 (Implicit Polynomial; IP) は、形状の補間や合成を簡単な計算で行うことが出来る利点があり、本研究ではこれを用いた手法を利用する。

提案手法は、石敷きの発掘記録等を基にした情報を 1) 位置, 2) 石の形状, 3) 石の間の空隙率パラメータの 3 つに抽象化してから再構成を行う。空隙率に応じて、石の原形を滑らかに変形して敷き詰め具合を調整し、IP の性質を用いて 2 つの領域間の滑らかな補間を計算する。目的領域の制御にラゲールボロノイ図を用いることで、自然な分布の表現を実現する。

これらの要素は、石敷きを再現する上で相互に影響するので、自然に調整する方法が課題となる。さらに提案手法は IP の特徴により 2D モデルだけでなく 3D モデルも扱うことが出来るが、本稿では 2 次元の場合に注目して議論する。

地面の石敷きの煩雑性と人工の規則性を備えた特徴に注目すると、石敷きの再現にあたって、以下のような課題がある。

- 発掘されるのは一部分であり、全てをそのままモデリングすることはできない
- 発掘資料が古い資料や手書きの絵の場合、質の良いものが揃わず、再計測も困難である
- 風化 (weathering) の影響があるため、写真をそのままテクスチャにしても当時の光景を再現できない

### 5.3 関連研究

土木学や CG の分野で石やパーティクルの分布モデルの生成手法が研究されている。形状と位置を独立設定する手法 [91]，最初に形状を決定する手法 [93]，最初に位置を決める手法 [92][96][94] などに分類できる。

Miyata[91] らは、正方形の粒子を最密充填しておいてからそれぞれの形状を置き換える石敷き編集手法を提案した。この方法は、石の形状と位置が独立に設定されるため、隙間や重なりが不自然に発生する問題がある。

ポロノイ図を用いて石の分布を制御することは 3 つの利点を持っている。

1. 各石の重心を母点の位置として、ポロノイ分割に用いて簡易に編集することができる
2. 各ポロノイ領域は凸多角形を描き、一般的な石の形状に類似するので、編集過程で不自然な結果を抑制できる
3. 空隙率を編集後に調整できる

Peytavie ら [92] は、乗法的重み付きポロノイ図を用いて非周期的に分布する石積みを実現している。ポロノイ図は式 5.1 のように表される [95]。

$$R(S, P_i) = \{P \in R^d \mid l(P, P_i) < l(P, P_j), j \neq i\} \quad (5.1)$$

表 5.1: 提案手法と先行研究の比較

	Peytavie ら [92]	Mollon ら [96]	提案手法
計測データ使用	-	可	可
3D 形状	可	-	可
ボロノイ図の形式	乗法的重み付き	通常	ラゲール
調整パラメータ		向き, 大きさ	
形状合わせ	浸食	フーリエ記述子	IP

点  $P$  と  $Q$  の距離をユークリッド距離  $l(P, Q)$  で表し, 空間  $R^d$  内に与えられた  $n$  個の母点を, 集合  $S = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ , とおく. すると,  $S$  の最近傍点が  $P_i$  として表される集合  $R(S, P_i)$  は, 母点  $P_i$  のボロノイ領域となる. これに対し, 乗法的重み付きボロノイ図の距離は式 5.2 で計算される.

$$l(P, P_i) = \frac{1}{g_i} \{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2\} \quad (5.2)$$

パラメータ  $g_i$  によって石の大きさを調整できる.

Mollon ら [96] は, 砂などの粉粒体を敷き詰めるモデルの生成を研究している. フーリエ記述子による輪郭の表現形式により, 指定された形状とボロノイ領域の間の隙間を調整している.

提案手法と先行研究を比較し, 表 5.1 に示す. Petavie の手法は 3 次元モデルを生成できるが, 望む領域に合わせて石の形を修正することは難しい. Mollon らの手法は, 任意の形状の石を生成できるが, 3 次元モデルの分布を生成できない. 提案手法は, IP を用いて 3 次元モデルの生成と自由な変形に拡張可能である. ただし, 本稿においてはとくに 2 次元の場合について議論する. モデリングデータは, ピクセル配列による画像のようなラスタデータで扱われることが多いが, 不連続であることに起因して伸縮処理や変形が誤差を発生させ易いという問題がある. IP のような数式表現を利用することは精度向上に効果があり, 少ないパラメータで表現できるため編集を容易にする効果がある.

またランダム性を用いた簡易な背景自動生成技術は他にも多数存在しているが, 入力としてモデリング結果を元にしたパラメータを用いて, オリジナルを保持したまま編集可能な手法は少ない.

これらの技術の応用として, 映画やゲーム等のエンターテイメント分野や, 地震や土砂災害のシミュレーションなどが挙げられ, 現実感や精度の向上に貢献する.

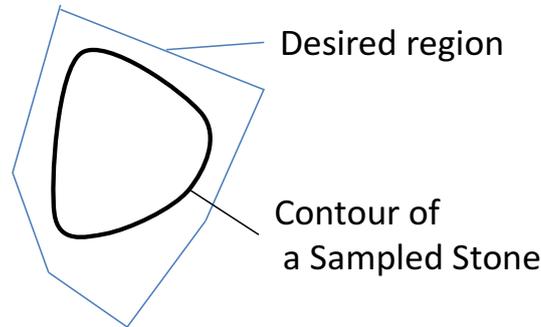


図 5.2: Issue of IP Fitting

## 5.4 2次元における石敷きテクスチャの生成

本節では、領域の分布をボロノイ図にラゲールボロノイ図を用いて表現し、石とボロノイ領域の輪郭の2者をIPを用いて補間を行う手法を解説する(図5.2).

### 5.4.1 ラゲールボロノイ図による分布表現

ラゲールボロノイ図は、ボロノイ図の距離の定義にユークリッド距離に代わりラゲール距離を用いたものである。母点  $P_i(x_i, y_i)$  に、非負の実数  $r_i$  を与え、任意の点  $P(x, y)$  と母点の間をラゲール距離を用いて計算する。ラゲール距離は次式で定義される。

$$l(P, P_i) = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 - r_i^2 \quad (5.3)$$

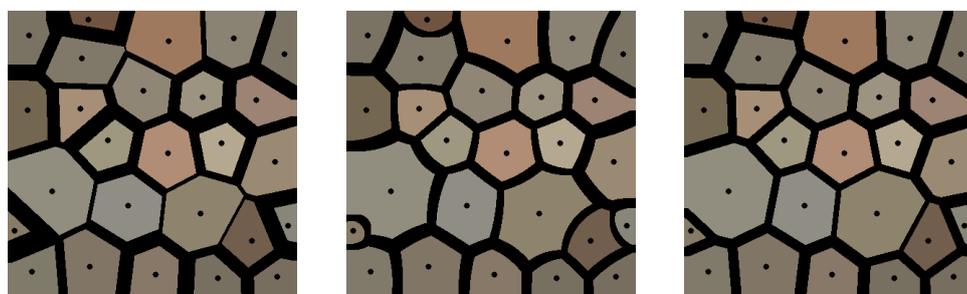
これは半径  $r_i$  の円に接線を引いた時の長さと同じ距離であり、円からの距離の比較のためのパラメータとして用いられる。

$P_i(1, 0), P_j(-1, 0)$  となる座標系をとると、ラゲールボロノイ領域の境界は、 $x = (r_j^2 - r_i^2)/4$  となる。したがって、 $P_i, P_j$  を結ぶ線分の垂線が境目となる。また、 $r_i$  が大きい方が領域も大きい。さらに、ボロノイ図のセルの形状は、凸多角形であることが保障される。また大きさの制御をパラメーター一つの変更によって調整できるため、石敷きの敷き詰め具合の編集を簡単化することができる。

ラゲールボロノイ図を用いた石敷き再現が、ボロノイ図や乗法的重み付きボロノイ図を用いた石敷き再現より適していることを確認するため、



図 5.3: 入力画像



(a) ボロノイ図 (b) 乗法的重み付きボロノイ図 (c) ラゲールボロノイ図

図 5.4: 3種類のボロノイ図での面積合わせの比較

比較実験を行った. 3つのボロノイ図の形式, 通常のボロノイ図と乗法的重み付きボロノイ図, およびラゲールボロノイ図の3つをそれぞれ, 各石の重心位置をボロノイ図の母点として設定し生成する. 乗法的重み付きボロノイ図における  $g$  は, 石の面積  $S_o$  と  $g = r^2 = S_o/\pi$  を用いて求める. ラゲールボロノイ図も同様に得る. 生成された石領域の面積を  $S_G$  とし, 原形の石と生成されたものの共通の領域の面積を  $S_{OnG}$  として表す. 石の原形  $S_o$  がボロノイ図の領域  $S_G$  が大きい場合は, 面積を合わせるために収縮処理にり,  $S_G \leq S_o$  とした. また, 評価項目として「A:  $S_o = S_G$  となる割合」と「B:  $(S_{OnG}/S_o)$  の平均値」を用いた. 図 5.3 に示した入力画像を評価のために用いた. また各石の領域と背景を指定したマスク画像を同時に与えた.

ボロノイ図を用いた再現の結果を, 図 5.4(a) に示した. 乗法的重み付

表 5.2: 3種類のボロノイ図による評価

ボロノイ図の形式	$S_O = S_G$ の石率 (%)	$(S_{ONG}/S_O)$ の平均 (%)
通常	92	83.8
乗法的重み付き	100	86.5
ラゲール	100	86.4

きボロノイ図を用いて再表現した結果は図 5.4(b) に示す。ラゲールボロノイ図を用いて再表現した結果は図 5.4(c) に示す。また、2つの評価項目  $A, B$  の結果を、表 5.2 に示す。

通常のボロノイ図では面積合わせがうまくいかず、形状と隙間を含むすべてに関して最も悪い結果であった。乗法的重み付きボロノイ図と、ラゲールボロノイ図の2つは、すべての石で面積を調整できており、評価値  $B$  もほぼ同値であった。ラゲールボロノイ図は、石が凸多角形になり類似した形状となった。乗法的重み付きボロノイ図は、石が大きい場合において形状をうまく表すことができなかつた。また部分的に領域を埋める凹形状があらわれており、不自然になる原因だと推測される。中程度の大きさの石では、乗法的重み付きボロノイ図は形状が丸まることによって形状合わせの値が高くなっている。

### 5.4.2 多項式陰関数表現 (IP)

次の式で表される  $n$  次多項式の関数を考え、

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{0 \leq i, j, k, i+j+k \leq n} a_{ijk} x^i y^j z^k = 0, \quad (5.4)$$

$f(\mathbf{x}) = 0$  となる曲線もしくは曲面で形状を表す方法が多項式陰関数表現 (Implicit Polynomial ; IP) である。例として、単位球を次式で表現することができる。

$$f(\mathbf{x}) = -1 + x^2 + y^2 + z^2 = 0. \quad (5.5)$$

$f(\mathbf{x})$  は、単項式ベクトルである  $\mathbf{m}(\mathbf{x})$ 、及び、 $\mathbf{a}$  で表される係数ベクトルの、2つベクトル間の内積を用いて、 $\mathbf{m}(\mathbf{x})^T \mathbf{a}$  として表される。

$$f(\mathbf{x}) = \underbrace{(1 \ x \ \cdots \ z^n)}_{\mathbf{m}(\mathbf{x})^T} \underbrace{(a_{000} \ a_{100} \ \cdots \ a_{00n})^T}_{\mathbf{a}}, \quad (5.6)$$

IP を用いて表現したい形状が,  $\mathbf{x}_i (i = 1, \dots, n)$  として表される点群であるとして,  $f(\mathbf{x})$  を正しく求めることを IP フィットティングと言う. この問題は, 式 5.7 の線形方程式を解くことに帰着することができる. IP によって表される曲面と,  $\mathbf{x}_i$  の距離の総和を最小化するような  $\mathbf{a}$  を最小二乗法によって求める.

$$\mathbf{M}\mathbf{a} = \mathbf{b}, \quad (5.7)$$

ここで,  $M = (\mathbf{m}(\mathbf{x}_1) \ \mathbf{m}(\mathbf{x}_2) \ \dots \ \mathbf{m}(\mathbf{x}_l))^T$ , である. また,  $\mathbf{b}$  は零ベクトルとする. ただし, 数値的安定性を高めるために, 3L method[97] 等の手法において  $\mathbf{b}$  を変更して調整する. 3L method[97] は,  $f(x) = 0$  の拘束とともに, 非 0 レイヤをその両側に作る. つまり  $f(\mathbf{x}_+) = +e$  の拘束と,  $f(\mathbf{x}_-) = -e$  で表される範囲に拘束する.  $\mathbf{x}_+$  は外側のレイヤの点群を表し,  $\mathbf{x}_-$  は内側のレイヤの点群を表し, ともに  $x_i$  から法線上の距離  $e$  の点群として指定できる.

高次の IP フィットティングでは収束に失敗することが多く, 特に複雑な形状においては望んだ曲面以外の位置に置いて  $f(\mathbf{x}) = 0$  が表れて曲面が余分に現出されることがある. IP フィットティングにおける余計な面形状の抑制のためにリッジ回帰 [98][99] (Ridge Regression; RR) が用いられる. リッジ回帰により余計な曲面の生成を抑制する方法として,  $M^T M$  に  $\kappa D$  を加えて式 (5.7) を

$$(M^T M + \kappa D)\mathbf{a} = M^T \mathbf{b} \quad (5.8)$$

とする. 正則化項を対角行列  $D$  と  $\kappa$  で表し,  $\kappa$  は正数の値であり RR パラメータと呼ぶ.

表したい形状の複雑さによって, 適切な IP の次数  $n$  は異なってくる. 適応的に次数を求める手法として, Zheng ら [100] は Adaptive IP Fitting という手法を提案し問題を解決している. この手順は, まずグラム・シュミットの直交化によって  $M$  を QR 分解し, 計算結果を再利用して段階的に次数を上げていく. フィットティングの精度が, *accuracy* 値以上になったら計算を停止することにより, 指定精度に対して最適な次数による IP を求められるようにしている.

### 5.4.3 IP による形状合わせ

それぞれの石と, ボロノイ領域が表す輪郭から, IP をそれぞれ図 5.2 のように計算する. 次に, 其々の IP の係数を線形補間することで敷き詰め

の調整を行う。それぞれの石の原形とボロノイ領域の輪郭は、同じ次元の IP で表現されており、各係数ベクトル  $\mathbf{a}$  を用いて補間を行うことができる。各係数ベクトルの表現として、補間をした IP と、ボロノイ領域を表す IP、および石の原形の IP、順に  $\mathbf{a}_{\text{lerp}}$ ,  $\mathbf{a}_{\text{voronoi}}$ ,  $\mathbf{a}_{\text{stone}}$  とすると、

$$\mathbf{a}_{\text{lerp}} = \alpha \mathbf{a}_{\text{voronoi}} + (1 - \alpha) \mathbf{a}_{\text{stone}} \quad (5.9)$$

により、簡単に線形補間を計算できる。 $\alpha$  が小さければ石の原形に近く、 $\alpha$  が大きいほどボロノイ領域の形状に近づき、敷き詰め具合が大きくなる。

## 5.5 実験

### 5.5.1 処理の流れ

ここで、石敷きモデルの調整によって IP を用いた変形手法の流れを確認する。フローチャートを図 5.5 に示す。Start から 2 つのデータストリームが派生する。左の処理は石敷きの形状データからの IP の計算で、右の処理は目的の石の分布の IP の計算過程である。Segmentation 処理は、入力された石敷きモデルから石を一つ一つの輪郭に切り分け、それぞれの IP を求める。右の処理は、目標とする石敷きの分布の IP の計算過程である。ラゲールボロノイ図は補間のための各々の石の目的領域を与える。それぞれの領域の輪郭に対して IPFitting を行い、IP を求める。右の処理で得られたボロノイ図の領域の中に、左の処理の流れで切り分けられた石を配置する。ブレンディング処理は IP の係数を用いて補間を計算する。

右の流れのボロノイ領域は任意に設定可能である。オリジナルが存在しない領域に対して、発掘情報を基にして分布密度を調整してランダム配置するなどにより、容易に編集可能である。

一例として、発掘現場の記録写真を元に欠落部分の石敷き再配置処理の手順を示す。飛鳥寺西方遺跡の調査報告書 [102] に記載された発掘時の写真の一つを入力画像 (図 5.6) として用いる。記録写真の多くは、航空写真などの一部を除き、地面に正対した構図の写真ではなくパースペクティブな構図でとられていることが多い。テクスチャ素材とするためには正対していた方が扱いやすいので、透視変換により正対図を作る。図 5.7 にボロノイ図の編集過程の例を示す。図 5.7(a) は入力画像である。画像解像度は資料によりまちまちであるので、閾値処理により 2 値化し石の

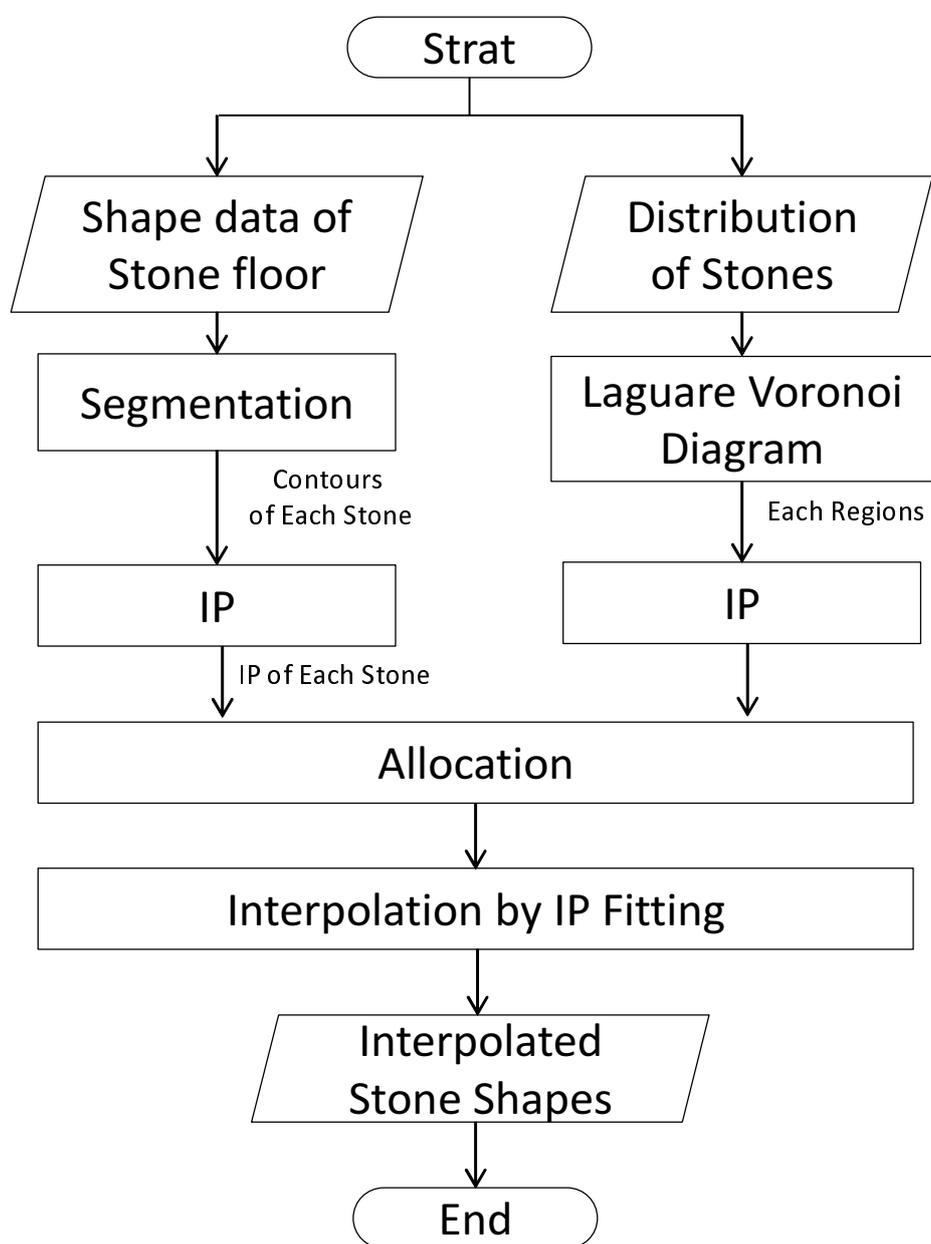


図 5.5: フローチャート



図 5.6: 石敷き写真の透視変換

分布を表すマスク画像 (図 5.7(b)) を作る. これをボロノイ変換すると図 5.7(b') を得る. 石を配置したい領域を選択し, 図 5.7(c) のボロノイ図の母点を配置する. ラゲールボロノイ図の場合, 母点には領域を持ったものを使用できる. 図 5.7(c') は再計算して得られたボロノイ図である. 図 5.7(d) のように追加されたボロノイ領域に配置したい石の形状を任意に選択し, パラメータ  $a$  を調整することによって, ボロノイ領域に適するように配置する石の形状を容易に編集できる.

### 5.5.2 実験結果

まず, 石敷きと変形目標となる領域を図 5.8 のように与える. 変形目標は, ラゲールボロノイ図で生成された石の分布の領域の境界である.

各石の原形の輪郭および, ボロノイ図の各領域の輪郭を IP フィッティングする.  $f(x) = 0$  の輪郭を復元することによって, 輪郭を表現することができる. 2つの IP を同じ次元にそろえることによって, 係数の線形補間を用いて 2つの領域の間の滑らかな変形が計算可能である. IP Fitting の計算の実装として, Adaptive-IP Fitting 法をリッジ回帰と 3L 法と一緒に用いて求めた. ボロノイ領域が石の領域より大きくなるように, 石の

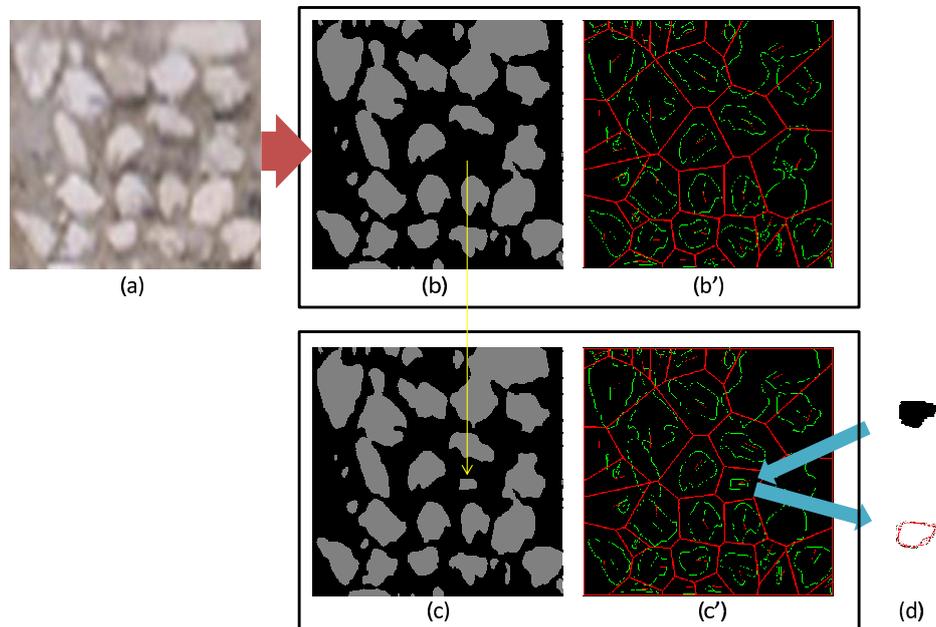


図 5.7: ボロノイ図の編集

初期形状に 0.9 倍のスケール調整を加えた。

IP を用いてボロノイ領域との間で石敷きに滑らかな変形を加えた結果を、図 5.9-5.11 に示す。図 5.9 は  $a = 0.0$ 、図 5.10 は  $a = 0.5$ 、図 5.11 は  $a = 0.8$  とし、左コラムは RR の値を  $k$  が 0.001 である場合と、右コラムは  $k$  が 0.01 である場合として線形補間した例を示している。 $k$  が 0.001 の場合は、形状が正しく表現できない石の出現が確認された。 $k$  が 0.01 の場合は、正しい形状を表現できており、ボロノイ領域への敷き詰め度合いの調整も可能であることが確認できた。これによって、IP を用いて石敷きテクスチャを変形することが可能であることを確認できた。

### 5.5.3 考察

$k=0.001$  では、 $a=0.5$  と  $a=0.8$  の条件で、補間によって正しくない領域ができる問題が見られた。また IP によって石領域の輪郭を合わせようとする、わずかに最先端部の形状が丸くなる問題が起きた。IP の基本的な特性に原因があり、角のある形状を低い次数において表現することが難しいためである。IP Fitting を安定に行うために  $k$  を大きくすることが

有効であるが、形状の再現精度が下がるため、IPの安定性と形状精度はトレードオフの関係にある。失敗の判断は、計算結果の凸包を比較することによって、元の領域と凸包の面積の比を求めることで判定できる。これを用いて $k$ を最小化することが有効である。

## 5.6 まとめ

本章では、IP及びボロノイ図を用いた、滑らかな石敷きモデルの変形の計算方法を提示した。とくにボロノイ図にはラゲールボロノイ図が適していることを示した。IPの補間によって、敷き詰め具合の自在な調整が可能であることを実験で確認した。今後の課題として、石の概形の編集だけでなく、テクスチャのような表面の詳細な形状の編集手法が挙げられる。

石敷きを素材として簡易に編集する手法は目途がついたが、コンテンツの中に実際に張り込むためのアルゴリズム開発が必要である。テクスチャは、荒過ぎても細かすぎても良くなく、ゲーム開発で使われているようなフーリエ変換による空間周波数解析に基づくテクスチャ粒度の調整などのアルゴリズムを開発していく予定である。

また、デジタルアーカイビングのツールとして実用化するためには、本手法を3Dに拡張しテクスチャのみでなくジオメトリデータの補間編集も可能にする必要がある。IPは3次元形状モデルにも適用可能であり、補間や変形などの編集の容易さに関する特徴は2次元と同様に保っている。今後、3次元形状に拡張した編集ツールも作成する予定である。



図 5.8: (左) 石敷きの形状データ, (右) 石の分布

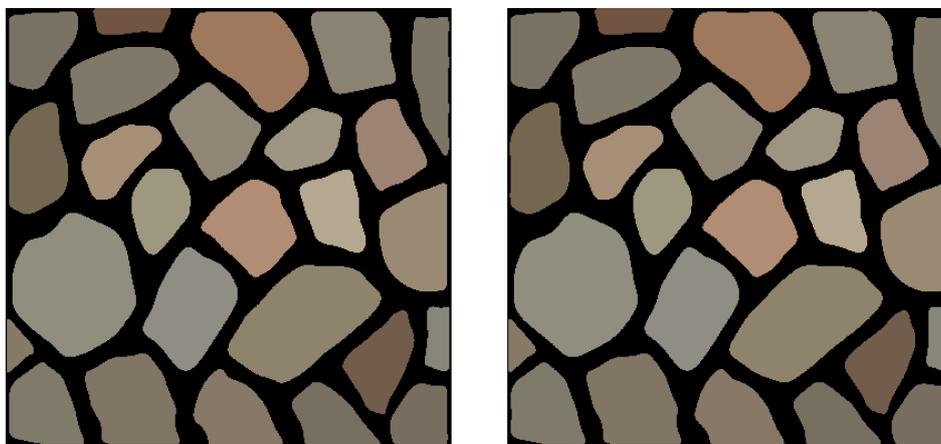


図 5.9: ケース 1:  $\alpha=0.0$ ,  $\kappa$  (L)0.001, (R)0.01

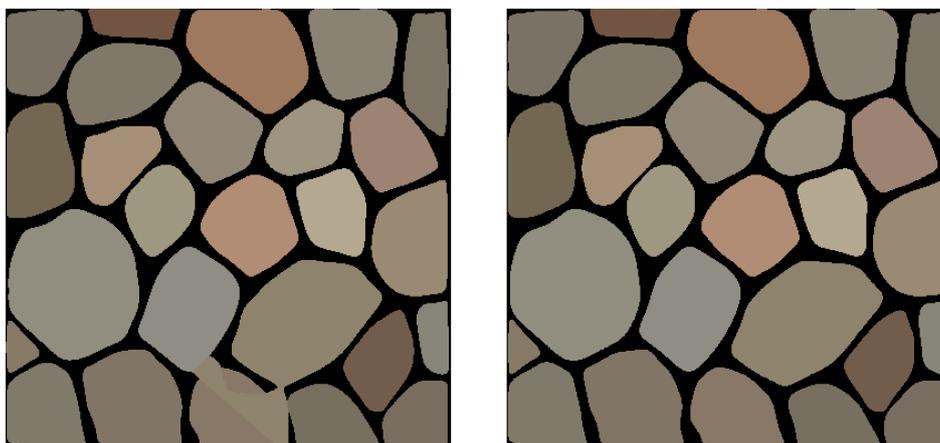


図 5.10: ケース 2:  $\alpha=0.5$ ,  $\kappa$  (L)0.001, (R)0.01

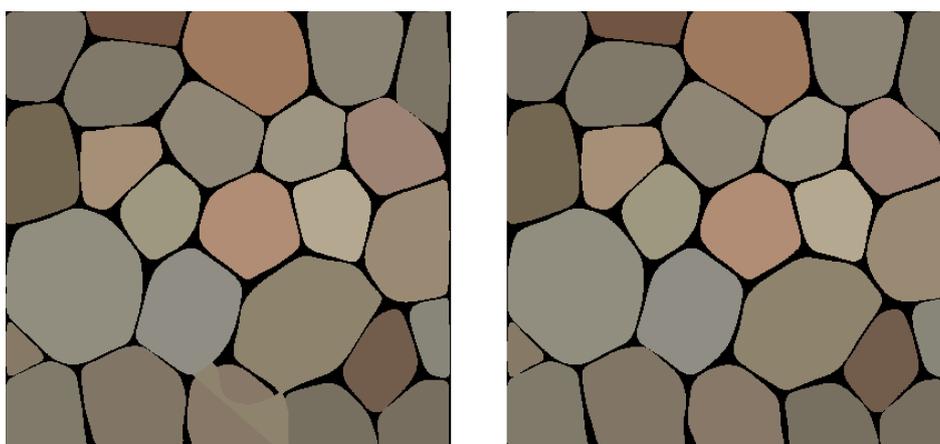


図 5.11: ケース 3:  $\alpha=0.8$ ,  $\kappa$ (L)0.001, (R)0.01

## 第6章 考察

第2章関連研究で述べたように，AR/VR/MRを代表とする新しいIT技術の観光への応用は，各地の様々な取り組みによって模索されている。しかし，黎明期ともいえる今は目新しさや技術先行の開発となりがちで，観光地に必要とされる需要へのアプローチが明確になっていなかった。

### 6.1 運用面における課題に対する解決

本研究において検討したい課題として，環境を壊さない導入方法，従来のサービスを壊さない導入方法，現地における運用，コミュニケーションの促進，移動の有効活用を挙げた。これらは，VR/MRを新規に観光の現場に導入するにあたり，とくに観光サービスの運用面において重要だと考えられるポイントである。観光の現場において，VR/MRシステムのユーザーは老若男女様々な観光客と，地元根付いて生活する人々であり，システムをユーザーが扱いやすく導入に抵抗のないものにすることが必要要件となる。

#### 6.1.1 環境を壊さない導入方法の解決案

環境を壊さない導入方法は，デジタルアーカイブを元にしたCGを用いた仮想復元と，携帯型(第3章)や移動型(第4章)の環境に機器やマーカーを設置しないVR/MRシステムによって施行した。長らく箱物行政が問題になっているため，新しい施設を建てることなく現状維持された史跡に価値を見出すことができる層も多い。そのため仮想復元はユーザーの理解も得られやすかった。従来のサービスを壊さない導入方法は，第3章において既存の観光サービスであるボランティアによるガイドツアーをサポートするツールとしてVR/MRシステムを開発することで施行した。ボランティアが各自の工夫として用いていた紙資料による解説を，提案システムに置き換える形で使ってもらうことで抵抗感の少ない導入が

できた。ただし開発には長期間を要しており、プロトタイプ開発からボランティアガイドのフィードバックを受けてより良いインターフェースやコンテンツに改良する工程を経ている。VR/MR システムの最良のデザインは確立されておらず、現状においてユーザーの声を細かく反映した設計に調整することは重要であろう。また、第4章においてMR モビリティシステムを用いて、史跡間を繋ぐ観光施設の何もなかった道路上をコンテンツに変えることを試みた。既存の観光サービスの邪魔をせず、移動の利便性を計りながら新しい観光体験を追加できる点に価値がある。

### 6.1.2 現地における運用と移動の有効活用の解決案

現地における運用と移動の有効活用は、第3章においてVR/MR 端末を持って現地に赴いて発掘情報に合わせて位置の正確性をもって仮想復元CGを体験することと、第4章において広範な範囲にわたって起きた歴史的事象を、MR モビリティシステムを用いてその場所を移動しながら仮想体験することによって施行した。歴史好事家ならずとも歴史的な事象がその場所で起きたということを想像しやすいので、時間を超えた臨場感を得られる効果があることが分かった。各ユーザーの想像に任せるところが大きいので、各自の知識や想像力に依存して得られる効果はまちまちで定量評価が難しいが、現在の現地の実際の風景と仮想復元による往時の風景を一カ所に立って見比べることによって、現在と往時の間の時間の流れを補間することによってノスタルジックな趣を感じる効果があるのではないかと考えられる。

### 6.1.3 コミュニケーションの促進の解決案

コミュニケーションの促進は、第3章の運用において確認された。ボランティアガイドと観光客の物理的距離を一定に保ち、双方に話をしながらVR/MR 体験するようにすることで会話の機会が増えるような運用形式を試みて、実際に狙い通りにコミュニケーションを促進することができた。この場合、VR/MR システムや歴史的な事象の復元コンテンツは主役ではなく、共通の興味の対象であることや会話のきっかけに過ぎないが、観光客がガイドの親切さに触れ、またガイドも楽しくイベントを実施することができており、双方に良い記憶を残すことができたと思う。観光体験として楽しかったという記憶を残すことは、VR/MR システム

の臨場感がユーザーに直接もたらす感動よりも重要であるかもしれない。国土交通省は観光をめぐる諸事情 [101] を次のように分析している。

- 「まち」の停滞
- IT化
- 少子高齢化
- 環境意識の高まり
- グローバル化
- 国民のライフスタイルの変化
- 生活レベルの向上

といった経済・社会環境の変化を受けて、人人、地域、国民経済、国際社会それぞれの立場にとって観光の意義が変化しつつあり、近年における観光をめぐる現状及び課題は、

- 「まち」の再活性化ニーズの増大（均一化した「まち」の表情への反省）
- 観光分野におけるIT化ニーズの増大
- 高齢者等が「気軽」に旅行できる環境整備ニーズの高まり
- 環境保全・向上の必要性の増大
- 訪日外国人旅行者数の伸び悩み
- 観光のもつ魅力の相対的低下
- 国民生活の変化に対応した観光産業の変革の遅れ
- 長期滞在型旅行の伸び悩み、
- 国民の日常的、基本的マナーやホスピタリティ意識の不十分さ

にあるとしている。具体的な課題が多く示されており、例えば、自然環境や文化財・文化遺産を良く保存していくことは、住民と観光客のいずれにとっても極めて重要であること、本物志向を観光振興の基本に据えて息長く継続的取組みを行っていくことが重要であること、新しいツーリズムへの対応が不十分であることなどが謳われている。VR/MRの観光応用は、ここに挙げられたいくつかの課題の解決案となるだろう。

## 6.2 技術面における課題に対する解決

現段階において VR/MR が抱える技術的課題のうち、次の 2 点について本研究において解決に取り組んだ。

### 6.2.1 音による臨場感の向上の解決

視覚のみではなく音を用いた臨場感の向上を目指して、第 4 章において音の複合現実感についての検討を行った。音の基本的な物理特性のうち、人間の空間知覚に関する特性を整理して、音響的整合性を保つための要件、すなわち、時間的整合性、エネルギー的整合性、周波数的整合性、位相的整合性を定義した。現実世界におけるユーザーの位置・姿勢に応じて実時間で音響処理を加えるために、周波数空間での畳み込み演算を主とした時間的整合性、エネルギー的整合性、周波数的整合性の実装を行い、MR モビリティシステムの音処理系として用いることで大規模空間での臨場感の向上に成功した。

音の物理的な特性を正確にシミュレーションしたものとは異なる音響効果ではあったがユーザー自身の位置と動きに合わせて音響効果に変化するために空間知覚をしやすい臨場感の向上に加えて、コンテンツ演出の幅を広げることにも有用であった。今後、音響計算の正確性の向上は更なる臨場感の向上に繋がるものと考えられる。また、音に限らず臨場感向上のための技術開発は必要であり、現在はまだほとんど扱われた例のない匂いや温度・湿度など人間の五感に訴える様々な物理的要素の導入を検討していく必要があるだろう。

### 6.2.2 コンテンツ制作コストの低減への道すじ

第 5 章で述べてきたように、コンテンツ製作の品質向上とコスト低減を両立するためのソフトウェアツールの開発も重要である。VR/MR は計算処理により映像や音響にエフェクトを掛けることになるが、そのための素材には何も効果が掛かっていない素なものであることが望ましい。たとえば、通常カメラで観察される物体の見えは、光源と物体の表面反射率の積で表される。カメラで取得した画像に光源の変化を加えたい場合、2重にエフェクトを掛けて不自然な結果としない為に、光源と物体の表面反射率は独立して得られた方が良い。更に形状や材質などの情報も

あった方が計算上の都合がよく、自然な合成処理結果を得られやすくなる。光源や表面反射率・形状・材質の取得方法は、それぞれ独立したコンピュータビジョンの1分野であるが、VRやMRに適用するためにはさらに厳しい要件が課される。実時間で処理することができ、極力目立つような大きな計測器を必要とせず、安価であることが望まれる。

音響の場合も同様に、マイクで計測される音は通常音源から発せられた音が聴取位置に到達するまでの間に通る空間から受けた効果が加えられている。したがって、VRやMRにおいて何らかの効果を加えたい場合、エフェクトの掛かっていない音源（ドライソース）が得られた方がよい。ドライソースの計測には無響室を用いることが一般的であるが、無響室の中に音源を持ち込み計測環境を用意することは困難である。そのために、音源分離および音響分離技術は製作コスト低減のために重要である。現状では、このような計測用のソフトウェアもハードウェアもほとんど存在していないので、VR/MR用にカスタマイズされた素材取得用のソフトウェアの開発が必要である。

## 6.3 その他の課題

### 6.3.1 VR/MR 展示を観光に組み込むための経済システム

観光の振興のためには、システムが一時的な需要喚起のためでは無く、飽きられることなく継続的に用いられる必要があり、そのためには観光の現場のみを考えるのではなく、全体を取り巻く大きな経済システムにおいてITサービスの位置づけを考える必要がある。観光の経済的成功のためには、関連する事業のすそ野を含む産業の山としての大きさが重要である。MRの観光応用はすそ野が広く、デジタルアーカイビングをはじめとする他の分野と連携したサービスのかたちを構築できればビジネス化を期待でき、VR/MRの仮想展示を観光に使用することで観光客の増加が促進されれば、観光地総体として一定の収益化が期待できる。デジタルアーカイブの対象である歴史的な文化財は、人々の興味を引き起こす高いポテンシャルを持っている。一方、掛けがえのない文化財をデジタルアーカイビングによって記録・保存することは社会的に重要である[47][48]。デジタルアーカイビングの活動は、公的機関により文化的な利益を見込んで税金等で運営されていることが多い[34]が、経済的に単独の商売として成り立たせることは難しい。デジタルアーカイビングの出

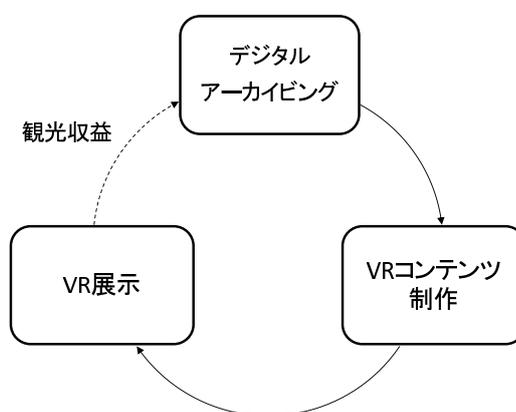


図 6.1: 観光利用の恒常化へのサイクル

口として VR/MR による展示を観光応用することで収益化につなげ、デジタルアーカイビングからコンテンツやシステム製作を経て、観光コンテンツとして展示応用するという流れの中で、経済的な循環を作り出すことが VR/MR の観光応用における当面の理想的な大きな目標であろう (図 6.1)。これらの循環を生み出すために、各機能を繋ぐことが必要とされる施策である。

### 6.3.2 地域に即した文化の展示

一般人や業者が文化財のデジタルアーカイブのデータを入手することは困難であり、とくに公共機関が保有する文化財データを商用目的で使用することは不可能に近い。デジタルアーカイブは記録保存のために作成される事例が多かったが、利活用の幅を広げて条件付きで解放されるべきである。ただし、文化財は希少であるから価値があるという側面があり、無条件で誰もがどこでも扱えるようにするべきではない。とくに観光の集客においては飽きは恐ろしいものであり、陳腐化しないため

のコントロールが必要であろう。司馬遼太郎の定義 [103] によれば、文化は「特定の集団 (たとえば民族) においてのみ通用する特殊なもので、他に及ぼしがたい。つまりは普遍的でない。」とある。つまり文化は、民族・地域に即して存在するべきもので、文化財の置かれた背景や地域から切り離すべきではない。例えば、インターネットでデータ配信をして、家の中で現地の風景をリアルに見せることは技術的には簡単であるが集客効果は限定的である。それよりも、地域限定でデジタルアーカイブを開放し VR/MR コンテンツの充足を計り、観光客が現地に実際に赴くための動機づくりに活用した方が良い。

### 6.3.3 継続的なシステムとコンテンツの更新

先に述べてきたように、観光の集客のためには目新しさも必要な要素である。VR/MR は編集や更新が容易であるので、来訪者がいつ何度来ても飽きないよう、絶えず更新し続けることが望ましい。コンテンツに限らず、システムも随時新しい技術を積極的に導入していくべきである。VR/MR 技術の観光応用のためには、解決すべき課題が多く残っている。これは否定的ではなく、一つの課題解決がコンテンツの魅力の増加に直結するので、産業としての広がりを見込める。

今後、多くの観光地で VR/MR の導入が進んでいくと予想されるが、技術や演出方法が陳腐化する前にいち早く新しい手法を取り入れ続けるべきである。本研究の取り組みについても、実のところ装置を屋外で実運用することに大きな労力を取られ、VR/MR の技術としては研究室内で使われるものに比べると簡易な物に過ぎなかった。しかし、実証実験当時は他に類似の実施例も極めて少なかったために、新しい体験ができたとして参加者の高い満足度を得ることができた。コンピュータビジョンの研究分野は日進月歩で技術が進んでおり、一つの技術の登場が飛躍的な革新と流行をもたらす事態が続いている。VR/MR 技術は発展途上にあるが、技術の完成度が高まるのを待たず、積極的に導入の試みを続けるべきである。

観光の基本的な課題である言語・道案内・トラブル対策などに、VR/MR 技術を活用することも重要となるだろう。サービスと観光客の相互コミュニケーションツールとしての VR/MR 活用は、まだ実例が少ない。外国語対応も含めて、対話的な VR/MR 体験の提供は今後の課題になってくるだろう。

## 第7章 まとめ

本論文は、観光の新しいかたちを探し求めるために、VR/MR を用いたデジタルアーカイブの展示を中心とした新しい観光の運用形式を調査した。デジタルアーカイビングやVR/MR といった技術を応用した観光イベントの実施や、アプリケーション提供の事例が、学術的にも商用的にも増えてきたが、観光応用に主眼を置いた分析は多くなかった。そこで、第2章の関連研究において、先行事例を整理し、観光という大きな枠組みの中でのVR/MR 技術の観光応用の位置づけと目指すべき方向を洗い出そうと試みた。

第3章において、モバイル型歴史体験端末の開発とそれを用いたガイドツアーという新しい運用形態を提案し、VR/MR の観光応用の事例を示した。飛鳥京の史跡を10名程度のグループで歩いて巡るガイドツアーイベントに付加する形で、モバイル型歴史体験端末によるVR/MR 体験を導入した。歴史体験端末の開発にあたり、2年間を掛けてユーザーであるボランティアガイドとトライアンドエラーを繰り返し、フィードバックを得ることにより、ユーザーの使いやすい物を作ることができた。システムは、技術的な先進性よりもユーザーにとっての使いやすさを重視し、直感的に理解しやすいシンプルなインターフェースとした。コンテンツは、現存の遺物を計測したデジタルアーカイブを元に製作した3D データを用いる方法、発掘記録を元にCADモデルにより復元する方法、現在の風景を借景し光源解析に基づいたCGレンダリング結果と重畳する複合現実を用いる方法を用いた。ガイドは遺跡の説明の際、歴史の謎が多く残る話であるとしても、極力最新の調査結果を調べるなどして正確な解説を行うことを意識していた。とくに説明に間違いや嘘が無いように細心の注意を払っており、歴史体験端末のコンテンツの詳細についても同様の正確さが求められた。往時の正確な風景の様子は色彩をはじめ分からないことも多いが、本研究では極力最新の考古学的知見に基づいて復元することを心がけており、ガイドの説明に一定のリアリティを加えることができたと思う。MRによる演出では、もし飛鳥京が現在に存在して

いたらこのように見えていたかもしれないと言うロマンを多少なりとも感じさせることができたものと思う。

第4章では、MR モビリティシステムを用いたストーリー仕立ての演出する運用形態を提案し、観光に特化した場合の新しい技術課題の解決方法の一例を示した。映像に加えて音響による広さや方向の表現を加えるために、広域を移動しながら立体音響を体験できるシステムを開発した。移動型 MR を用いたのは、観光における移動の無駄時間を積極的に楽しいものに変えようという試みであった。イベントを行った伝飛鳥板蓋宮跡の現在の風景は田畑が広がるだけの風景である。これを一つの観光コンテンツに変えることができることを示せたのは、一定の成果だといえよう。古代の音源は記録に残らずデジタルアーカイブを用いることができないため、想像による復元をせざるを得なかった。音響の物理特性は今も昔も変化は無いはずであるが、現実感のある過去の音源の復元は今後の課題である。

第5章では、VR/MR の観光応用においてコンテンツの作成コスト低減は重要であることに着目し、石敷きのような背景テクスチャを少ないパラメータで容易に編集できるように、数式表現を用いた形状編集ツールを提案した。乱数を用いて自然背景を生成する方法とは異なり、本手法は部分的に与えられた形状を保ったまま、分布を調整したり石の形状を変形できる点に特徴がある。このため、発掘された遺跡の石敷きを基に、欠損した部分を埋めるように分布を編集でき、個々の石の形状も発掘された他の石を元に変形できるので、自然な復元ができる。

本研究では、VR/MR による歴史体験の観光応用を世に先駆けて実施したことによって課題と可能性が見えてきた。かつて小さいビジネスであったTVゲームは、楽しいことを売りにして大きな産業となった。デジタルアーカイブのVR/MRを用いた展示を中心として、既存の観光サービスを補完するかたちで、従来観光の対象でなかった事物や場所を新しい観光コンテンツに変えることができれば、観光のキャパシティを伸ばしてもっと大きな産業に育てることができるのではないだろうか。人口減少が経済低迷の主要因であると考えられるため、インバウンドツーリズムに向けた言語や道案内などの外国人向けカスタマイズも重要である[16][17]。これらの課題に真剣に取り組む土壌ができれば、観光のみならず周辺産業までを含めて、ゲーム産業にも劣らない需要を喚起できる可能性があるのではないか。VR/MR は、観光をもっと楽しくする実力を秘めているものと信じる。

Futureworks として早急に解決されるべき2つの技術的課題について言及する。

VR/MRのコンテンツ素材は、演出効果を加えるために他の効果が掛かっていない素な状態のものであることが望ましい。例えば、視覚では物体の表面反射率と光源環境を独立に取得することであり、聴覚では無響室で録音されるドライソースと空間音響のパラメータを独立に取得することである。これらは各専門分野においても研究の進む重要なテーマであり、コンテンツ制作のために気軽に使えるようなカスタマイズの研究が必要であり今後の課題である。

また、感動の共有のためにSNS等に記録を残してもらい、他のユーザを呼び込むフィードバックループを構成することは重要である。しかし、観光地でVR/MR体験したユーザに感想を書き残してもらうことを自然に促すのは難しい。例えば掲示板のようなコメント共有の仕組みを用意したとしても、わざわざ書き込む人は、余程深い感銘を受けた少数の人か、サービスに対する不満や愚痴を書き込む人が大半を占めるだろう。感情の一定の閾値を超えた偏った意見ばかりが集まる恐れがある。感想は強くコントロールされるべきではないが、観光地の風評被害は甚大な被害をもたらすことがある。悪い印象がインターネットやTVなどのメディアを通して瞬時に全国に知れ渡り、忌避されるような負の感情が長い間言い伝えられて、集客ができなくなるという問題の実例が多く存在している。このような事態を防ぐ仕組みの確立が必要である。

さらにいえば、感想をアンケートのように文字によって直接聞き取ることが無粋であろう。アンケートの文言によってはサービス提供者側の狙いが類推されて、観光の感動を興覚めさせてしまう恐れすらある。WEBサービスでは、ビッグデータと呼ばれる不特定多数の人のネット上の行動履歴を元に、人々の興味を暗黙の裡に調査し、データに即したマーケティングを行い、ユーザの興味を引く検索エンジンの検索結果を提示することで、気が付かれないうちに人々の行動をコントロールしている。現実世界で似たような仕組みを作る良いアイデアはまだ形にされていない。ロボットを用いた自然な対話型コミュニケーションにより、そのようなフィードバックを得られないだろうかと期待されている。有形無形のロボットを観光の現場に持ち込むことが、次の段階として重要な課題であると思う。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって終始ご指導とご鞭撻を頂きました東京大学大学院情報学環 池内克史名誉教授，大石岳史准教授に深く感謝の意を表します。とくに博士前期課程から数えて17年以上に渡って親身にご指導いただき続けられていますことを深く御礼申し上げます。また，研究室の同僚として長期に渡って共に研究生活を送ってきた小野晋太郎特任准教授，影沢政隆助教，岡本泰英特任助教，鎌倉真音特任研究員，長谷川仁則技官，阪野貴彦博士，鄭波博士各位に心より感謝いたします。また，榎崎雄太氏，進矢陽介氏をはじめとする池内・大石研究室の学生諸君には，楽しい時間を共有できたことお礼申し上げます。さらに，学会発表や事務手続きなどでお世話になりました池内・大石研究室の秘書の皆様にも感謝いたします。

また、本論文を作成するにあたり懇篤なるご指導とご高閲を承りました電気通信大学工藤俊亮准教授，末廣尚士教授に心より御礼申し上げます。とくに工藤先生とは学生時代から現在まで多くの研究をともに遂行できていることを幸せに思います。また林直宏君をはじめとする末廣・工藤研究室の学生諸君には同僚として楽しい学生生活を送れましたことを感謝します。

和歌山大学 小川原光一准教授には，偉大な先輩として長期にわたりご指導いただけましたことを感謝申し上げます。奈良先端科学技術大学院大学 高松淳准教授には学生生活の中で苦楽を共にできたこと喜びに感じております。また最初の指導教官であった木村浩先生にも東京大学での研究の機会を下さったことお礼申し上げます。

飛鳥里山クラブ，飛鳥京観光協会，明日香村，国営飛鳥歴史公園事務所，奈良文化財研究所，橿原文化財研究所，株式会社アスカラボ，民宿若葉各位に感謝します。東京大学 坂本慎一先生，横山栄先生には，システム検証にあたり助言協力を頂きました。本研究は，文部科学省デジタルミュージアムプロジェクト，総務省戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE) (コード番号 115103002) の助成を受けたものである。

## 関連図書

- [1] 日本政府観光局 発表資料:[http://www.jnto.go.jp/jpn/news/data\\_info\\_listing/pdf/151118\\_monthly.pdf](http://www.jnto.go.jp/jpn/news/data_info_listing/pdf/151118_monthly.pdf)
- [2] 観光統計: <http://www.mlit.go.jp/common/001116071.pdf>
- [3] 経済広報センター: 観光に関する意識・実態調査報告書, 2010.
- [4] 旅行に関する調査: [http://www.oz-vision.co.jp/news\\_release/pdf/140310.pdf](http://www.oz-vision.co.jp/news_release/pdf/140310.pdf), 2014.
- [5] 館, 佐藤誠, 廣瀬通孝: “バーチャルリアリティ”, p.10, 2010.
- [6] 蔵田武志, 清川清, 大隈隆史: “AR(拡張現実)技術の基礎・発展・実践”, p. 378, 科学情報出版, 2015.
- [7] Y. Ohta, H. Tamura: “Mixed Reality: Merging Real and Virtual Worlds,” Ohmsha, pp.368-371, 1999.
- [8] S. Feiner, B. MacIntyre, T. Hollerer, A. Webster: “A touring machine: prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment,” Wearable Computers, Vol. 1, No. 4, pp. 208-217, 1997.
- [9] 坂村健: “東京大学デジタルミュージアム”, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.1, pp.7-10, 1998.
- [10] 池内克史: “デジタルミュージアム構想: e-Heritageの構築・展示・利活用”, 電子情報通信学会技術研究報告, パターン認識・メディア理解 (PRMU), Vol. 106, No. 469, pp. 19-24, 2007.
- [11] 小黒久史: “高精細VRの文化財アーカイブへの応用”, ITE Technical Report, Vol.27, No.21, pp.63-66, 2003.

- 
- [12] C. Park, H. Ko, T. Kim: “NAVER: Networked and Augmented Virtual Environment aRchitecture; design and implementation of VR framework for Gyeongju VR Theater,” *Computers & Graphics*, Vol. 27, Issue 2, pp. 223–230, 2003.
- [13] 佐竹真一: “ツーリズムと観光の定義 -その語源的考察、および、初期の使用例から得られる教訓-”, *大阪観光大学紀要, 開学 10 周年記念号 10*, pp.89–98, 2010.
- [14] 近藤智嗣, 有田寛之: “博物館教育における I C T 活用”, *メディア教育研究*, Vol.6, No.1, S34–S43, 2009.
- [15] H. Tamura, H. Yamamoto, A. Katayama: “Mixed reality: future dreams seen at the border between real and virtual worlds,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.21, Issue 6, pp.64–70, 2002.
- [16] デービッド アトキンソン: “新・観光立国論”, p.56, 2015.
- [17] 河村誠治: “わが国インバウンド・ツーリズムと地方の課題”, *長崎国際大学論叢*, pp.11-21, 2003.
- [18] 井上雄治: “三次元 CG による藤原京の再現について”, *日本教育情報学会, 年会論文集*, Vol. 24, pp.222–223, 2008.
- [19] 井上雄治: “三次元 CG による藤原京再現の発展と活用”, *日本教育情報学会, 年会論文集*, Vol. 25, pp.326–327, 2009.
- [20] P. Milgram, F. Kishino: “A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays,” *IEICE Trans. Information Systems*, E77-D(12), 1994.
- [21] 大石岳史, 檜崎雄太, 岡本泰英, 角田哲也, 佐藤啓宏, 阪野貴彦, 影沢政隆, 池内克史: “複合現実感モビリティシステムの開発”, *生産研究*, Vol. 64, No. 2, pp.203–208, 2012.
- [22] 角田哲也, 大石岳史, 牧野浩志, 池内克史: “スマートツーリズム: 明日香村における複合現実感技術を用いた観光 ITS の取り組み”, *第 8 回 ITS シンポジウム*, 2009.

- 
- [23] 矢野桂司, 高瀬裕, 河原大, 岩切賢, 井上学, 古賀慎二, 河原典史, 河角龍典: “京都バーチャル時・空間の構築－四条通り界限を中心に－”, 人文科学とコンピューターシンポジウム論文集, Vol. 2003, No. 21, pp.103–110, 2003.
- [24] 崔雄, 西浦敬信, 矢野桂司, 八村広三郎: “祇園祭バーチャル山鉦巡行”, 電子情報通信学会技術研究報告パターン認識・メディア理解 (PRMU), Vol. 110, No. 381, pp.365–370, 2011.
- [25] 桐村喬, 瀬戸寿一, 中谷友樹: “人と文化財を災害から守るためのハザードマップ提供システムの開発-オープンソース WebGIS を用いて-”, 人文科学とコンピューターシンポジウム論文集, Vol. 2006, No. 17, pp.355–362, 2006.
- [26] 奈良県, なら平城京歴史ぶらりアプリ配信開始:  
<http://www.pref.nara.jp/item/99185.htm>
- [27] 広報むこう: 史跡があなたの手の中に復元・体感 AR 長岡宮,  
<http://www.city.muko.kyoto.jp/media/muko2014/140415h/140415.pdf>
- [28] 河角龍典, 橋本隆憲, 山中章, 高瀬裕, 矢野桂司: “「バーチャル長岡京 3D マップ」の構築と博物館展示への活用”, 人文科学とコンピューターシンポジウム「じんもんこん 2007」, デジタルアーカイブと時空間の視点, 1A-4, 2007.
- [29] think with Google:  
<http://www.thinkwithgoogle.com/insights/featured/five-stages-of-travel/>.
- [30] Google Cardboard:  
<https://www.google.com/get/cardboard/>.
- [31] Google Project Tango:  
<https://www.google.com/atap/project-tango/>.
- [32] Facebook newsroom:  
<http://newsroom.fb.com/news/2014/03/facebook-to-acquire-oculus/>.

- 
- [33] 神成淳司, 松原仁: “農業情報学・観光情報学と人工知能”, 第 23 回人工知能学会全国大会, 1D2-OS6-2, 2009.
- [34] 栗原祐司: “文化財等のデジタルアーカイブ推進に向けて”, シンポジウム「文化情報の整備と活用～デジタル文化財が果たす役割と未来像」, 2011.
- [35] 大石岳史, 増田智仁, 倉爪亮, 池内克史: “創建期奈良大仏及び大仏殿のデジタル復元”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol.10, No.3, pp.429–436, 2005.
- [36] 阿部信明, 河合隆史, 大谷淳, 査紅彬, 安藤真: “中国麦積山石窟のデジタルアーカイブと VR コンテンツ” 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol.14, No.3, pp.275–282, 2009.
- [37] Tandent Lightbrush: engineering an image:  
<https://www.fxguide.com/featured/tandent-lightbrush-engineering-an-image/>
- [38] 井上祥史, 伊藤敏: “ミックスド・リアリティ・システムの教育利用と課題”, 教育システム情報学会第 37 回全国大会, 2012.
- [39] 深田秀実, 船木達也, 兒玉松男, 宮下直也, 大津晶: “画像認識型 AR 技術を用いた観光情報提供システムの提案”, 情報処理学会システムと社会環境, 2011-IS-115(13), pp.1–8, 2011.
- [40] 谷口伸一: “ユビキタスによる着地型観光サービスの研究”, 彦根論叢 (381), pp.127–155, 2009.
- [41] 高田百合奈, 渡邊英徳: “道しるべ Map: ターゲティング型地図ナビゲーションシステムの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 (TVRSJ), Vol. 19, No. 3, pp. 387–395, 2014.
- [42] 伊藤香織, 小泉直也, 苗村健: “CoPlet: 感想共有・鑑賞体験記録に基づくミュージアムツアー支援システム”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 (TVRSJ), Vol. 20, No. 2, pp. 133–142, 2015.
- [43] 徳久悟, 吉野弘一, 小幡光一, 遠藤志津子, 岩崎花梨, 武田港, 柴崎美奈, 神山洋一, 南澤孝太: “東京国立博物館・特集展示「伊能忠敬の日本図」とミュージアムシアターを活用したサービスデザインプラ

- クティス”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 (TVRSJ), Vol. 20, No. 1, pp.3–14, 2015.
- [44] 渡邊祐子, 吉田飛里, 池田雄介, 伊勢史郎: “聴覚ディスプレイ装置を用いた音場シミュレータの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 (TVRSJ), Vol. 20, No. 1, pp.45–53, 2015.
- [45] 柴田史久, 松田祐樹, レヴァンギア, 川端大輔, 山賢人, 木村朝子: “モバイル MR システム構築のための機能分散型フレームワークの設計と実装”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 (TVRSJ), Vol. 19, No. 2, pp.215–225, 2014.
- [46] 小林まおり, 福井誠人, 上野佳奈子: “3次元音場再現システムでのコンテンツ選択における指針の提案”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 (TVRSJ), Vol. 19, No. 1, pp.37–45, 2014.
- [47] 徳川義崇: “文化を遺す意義と努力-尾張徳川家を例にとって-VR技術への期待”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 19, No. 4, pp.188–195, 2014.
- [48] 加茂竜一: “文化財のデジタルアーカイブと VR 公開”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 19, No. 4, pp.196–205, 2014.
- [49] 日経 BP 社: “AR のすべて ケータイとネットを変える拡張現実”, pp.206–208, 2009.
- [50] 渡辺昌弘, 深野暁雄: “3D の時代”, pp.87–88, 2010.
- [51] Y. Huang, Y. Liu, Y. Wang: “AR-View: An augmented reality device for digital reconstruction of Yuangmingyuan,” IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Arts, Media and Humanities Proceedings, pp. 3–7, 2009.
- [52] C. Morales, T. Oishi, K. Ikeuchi: “Turbidity-based aerial perspective rendering for mixed reality,” IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp.283–284, 2014.
- [53] T. Fukiage, T. Oishi, K. Ikeuchi: “Visibility-Based Blending for Real-Time Applications,” IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp.63–72, 2014.

- 
- [54] 竹田智哉, 大石岳史, 阪野貴彦, 池内克史: “MR 技術のための既存映像からの人物作成”, 電子情報通信学会技術研究報告, パターン認識・メディア理解 (PRMU), Vol. 112, No. 441, pp.31–36, 2013.
- [55] 鈴木健太郎, H. Zhao, 川上玲, 池内克史: “屋外撮影画像中の天空領域を用いた拡散反射物体の表面反射率の推定”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU), OS2-1, 2013.
- [56] M. Inaba, A. Banno, T. Oishi, K. Ikeuchi: “3D レンジデータを用いた屋外複合現実感のための頑健な位置合わせ”, VRST, 2012.
- [57] Y. Okamoto, T. Oishi, K. Ikeuchi: “大規模 3 次元モデルと付加情報の閲覧および関連付けシステム”, The Journal of The Institute of Image Information and Television Engineers, Vol. 11, No. 186, 2010.
- [58] 守谷修: 「バーチャル飛鳥京プロジェクト」について; 国土交通省近畿地方整備局研究発表会,  
<http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/happyou/theses/2010/pdf05/12.pdf>
- [59] 角田哲也, 大石岳史, 小野晋太郎, 池内克史: “バーチャル飛鳥京: 複合現実感による遺跡の復元と観光案内システムへの展開”, 生産研究, 59 巻 3 号, pp.26–29, 2007.
- [60] 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」”, パターン認識・メディア理解, Vol. 103, No. 584, pp.1–6, 2004.
- [61] 崔雄, 西浦敬信, 矢野桂司, 八村 広三郎: “祇園祭バーチャル山鉾巡行”, パターン認識・メディア理解, Vol.110, No.381, pp.365–370, 2011.
- [62] トップラン VR デジタルアーカイブ: 観光用途での活用;  
<http://www.toppan-vr.jp/bunka/vr/sight.shtml>
- [63] D. Stricker, A. Pagani, M. Zoellner: “In-Situ Visualization for Cultural Heritage Sites using Novel Augmented Reality Technologies,” Invited Paper at the International Conference on Graphic Archeology and Cultural Heritage, pp.17–20, 2009.

- 
- [64] iTacitus: Intelligent tourism and cultural information through ubiquitous services,  
<http://www.itacitus.org/>
- [65] なら飛鳥京歴史ぶらり -ATR Creative-;  
<http://atr-c.jp/burari/product/theme/aska.html>
- [66] 長崎市の歴史や文化を活用したまち歩き「長崎さるく」:  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000063244.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000063244.pdf)
- [67] 鴻臚館・福岡城バーチャル時空散歩:  
[http://www.city.fukuoka.lg.jp/keizai/kankous/charm/jikusanpoboshu\\_2.html](http://www.city.fukuoka.lg.jp/keizai/kankous/charm/jikusanpoboshu_2.html)
- [68] 赤熊高行, 大倉史生, 佐藤智和, 横矢直和: “事前生成型モバイルAR”, 第18回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2013.
- [69] 明日香村の現況について:  
<http://www.mlit.go.jp/common/000026802.pdf>
- [70] T. Kakuta, T. Oishi, K. Ikeuchi: “Development and Evaluation of Asuka-Kyo MR Contents with Fast Shading and Shadowing,” Proc. Int. Society on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM 2008), pp.254–260, 2008.
- [71] 池内克史, 大石岳史, 角田哲也, 佐藤啓宏, 岡本泰英: 特許 仮想物体影作成装置および合成画像作成装置並びに仮想物体影作成方法、プログラム, 公開番号 2011-060195.
- [72] 千代裕介, 阪野貴彦, 大石岳史, 池内克史: “時間方向への外挿・内挿に基づく前景領域抽出とフレーム補間”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011), 2011.
- [73] 大倉史生, 神原誠之, 横矢直和: “無人飛行船からの空撮全方位動画像を用いた蓄積再生型拡張テレプレゼンス”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 16(2), pp.127–138, 2011.
- [74] 角田哲也, 大石岳史, 牧野浩志, 池内克史: “スマートツーリズム: 明日香村における複合現実感技術を用いた観光 ITS の取り組み”, 第8回 ITS シンポジウム 2009, 1-B-12, 2009.

- 
- [75] 柴田 史久, 田村 秀行: “モバイル複合現実感システム—多様なモバイル機器に対応した汎用フレームワーク”, 画像ラボ 17(6), pp.37–42, 2006.
- [76] 小田島太郎, 神原誠之, 横矢 直和: “拡張現実感技術を用いた屋外型ウェアラブル注釈提示システム”, パターン認識・メディア理解 102(554), pp.73–78, 2003.
- [77] 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—平城京跡ナビ”, 信学技報, 103(584), pp.1–6, 2004.
- [78] 大石岳史, 檜崎雄太, 岡本泰英, 角田哲也, 佐藤啓宏, 阪野貴彦, 影沢正隆, 池内克史: “複合現実感モビリティシステムの開発”, 生産研究 64(2), pp.203–208, 2012.
- [79] 森勢将雅, 湊佳彦, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村 秀行: “視覚・聴覚を併用した複合現実感システムのための頭部伝達関数の個人化”, IEEJ Trans. EIS, Vol.130, No.1, 2010.
- [80] 吉野将治, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “視覚・聴覚を併用した複合現実感システムの開発 (4) —複合現実空間での音の反射・遮断の実現—”, 日本バーチャルリアリティ学会第13回大会論文集, 2008.
- [81] C. Lauterbach, A. Chandak, D. Manocha: “Interactive sound rendering in complex and dynamic scenes using frustum tracing,” Visualization and Computer Graphics, IEEE Trans., vol.13, Issue.6, pp.1672–1679, 2007.
- [82] N. Raghuvanshi, J. Snyder, R. Mehra, M. Lin, and N. Govindaraju: “Pre-computed wave simulation for real-time sound propagation of dynamic sources in complex scenes,” ACM Trans. Graph. 29, 4, Article 68, 2010.
- [83] 小木哲朗, 茅原拓朗, 加藤允文, 浅山宏, 廣瀬通孝: “没入型多面ディスプレイのためのインタラクティブ高臨場感音場提示手法,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.8, No.1, pp.75–84, 2003.
- [84] 吉野将治, 村井嘉彦, 森勢将雅, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “視覚・聴覚を併用した複合現実感システムの開発 (5) ～ヘッ

- ドホンとスピーカの併用による音提示法の拡張～”, 電気通信学会信学技報, vol. 109, no. 374, pp. 305–310, 2009.
- [85] 日本建築学会: 音環境の数値シミュレーション-波動音響解析の技法と応用; 日本建築学会, 2011.
- [86] 檜崎雄太, 佐藤啓宏, 大石岳史, 池内克史: “MR Sound System –空間形状計測を用いた実時間音場生成系の基礎的検討”, 日本音響学会 2012 春季大会, 2012.
- [87] Real sound lab: CONEQ; <http://www.realsoundlab.com/>
- [88] HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone; <http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html>
- [89] OpenAL: <https://www.openal.org/>
- [90] 朝日新聞: “出会いの広場、石敷き溝 明日香村・飛鳥寺西方遺跡”, 2011年11月25日.
- [91] K. Miyata, T. Itoh, K. Shimada: “A Method of Generating Pavement Textures Using the Square Packing Technique,” *The Visual Computer*, vol.17, no.8, pp.475–490, 2001.
- [92] A. Peytavie, E. Galin, J. Grosjean, S. Merillou: “Procedural generation of rock piles using aperiodic tiling,” *Proc. of Pacific Graphics*, vol.28, no.7, pp.1801–1809, 2009.
- [93] C. Ma, L. Wei, X. Tong: “Discrete element textures,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 30, No. 4, pp. 62:1–62:10, 2011.
- [94] 櫻井快勢, 宮田一乗: “地表に無造作に配置された岩石の生成手法”, *芸術科学会論文誌*, Vol. 10, No. 3, pp. 98–106, 2011.
- [95] 杉原厚吉: “なわばりの数理モデルーボロノイ図からの数理工学入門ー”, 共立出版, 2009.
- [96] G. Mollon, J. Zhao: “Fourier–Voronoi-based generation of realistic samples for discrete modelling of granular materials,” *Granular Matter*, vol.14, no.5, pp.621–638, 2012.

- 
- [97] M. M. Blane, Z. Lei, H. Civi, D.B. Cooper: “The 3L algorithm for fitting implicit polynomial curves and surfaces to data,” *Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence(PAMI)*, vol.22, no.3, pp.298–313, 2000.
- [98] T. Tasdizen, J. P. Tarel, D. B. Cooper: “Improving the Stability of Algebraic Curves for Applications,” *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol. 9, No. 3, pp.405–416, 2000.
- [99] T. Sahin, M. Unel: “Globally Stabilized 3L Curve Fitting,” *Springer, Image Analysis and Recognition*, Vol. 3211, pp 495-502, 2004.
- [100] B. Zheng, J. Takamatsu, K. Ikeuchi: “An adaptive and stable method for fitting implicit polynomial curves and surfaces,” *Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence(PAMI)*, vol.32, no.3, pp.561–568, 2010.
- [101] 国土交通省:観光をめぐる諸事情 ,  
[http://www.mlit.go.jp/kisha/oldmot/kisha00/koho00/tosin/kansin/kansin1\\_.html](http://www.mlit.go.jp/kisha/oldmot/kisha00/koho00/tosin/kansin/kansin1_.html)
- [102] 明日香村教育委員会: “明日香村の文化財 17 飛鳥寺西方遺跡”, 2011年.
- [103] 司馬遼太郎: アメリカ素描, 新潮文庫, 1989.
- [104] 池内克史, 佐藤洋一, 西野恒, 佐藤いまり: “複合現実感における光学的整合性の実現”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌 (TVRSJ)*, Vol. 4 No. 4, pp.623–630, 1999.

## 関連論文の印刷公表の方法及び時期

- (1) 佐藤啓宏、大石岳史、池内克史  
論文題目「VR/MR ガイドツアーシステムの開発と運用」  
平成 26 年 6 月日本バーチャルリアリティ学会論文誌, VOL.19, NO.2(第 3 章に相当)
  
- (2) 佐藤啓宏、檜崎雄太、大石岳史、池内克史  
論文題目「移動型 MR におけるサウンドシステムの開発」  
平成 26 年 6 月日本バーチャルリアリティ学会論文誌, VOL.19, NO.2(第 4 章に相当)
  
- (3) Yoshihiro Sato, Yosuke Shinya, Bo Zheng, Takeshi Oishi, Katsushi Ikeuchi  
論文題目「Modeling the Stone Floor Based on Excavation Information Using Implicit Polynomial」  
平成 27 年 5 月 IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA2015), 05-09(第 5 章に相当)