

文化遺産アーカイブにおける立体視表現に関する研究

Study on stereoscopic representation for digital heritage

早稲田大学 大学院国際情報通信研究科

国際情報通信学専攻 先端メディアと人間工学研究Ⅱ

阿部 信明

目次

第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景.....	1
1.2 関連研究と関連分野の動向.....	3
1.2.1 文化遺産のデジタルアーカイビング.....	3
1.2.2 3D ディスプレイの原理と普及.....	3
1.2.3 3D 映像コンテンツの普及と課題.....	6
1.3 本研究の目的.....	7
1.4 本論文の構成.....	8
1.5 参考文献.....	11
第2章 文化遺産デジタルアーカイブの公開と 3D 映像表現.....	13
2.1 はじめに.....	13
2.2 文化遺産の 3次元デジタルアーカイブの利活用に関する先行研究.....	13
2.3 文化遺産アーカイブの 3D 映像呈示に関する先行研究.....	15
2.4 3D 映像表現.....	18
2.4.1 3D 映像の原理と立体情報.....	18
2.4.2 3D 映像における立体感の再現性.....	19
2.4.3 3D 映像の演出と設計.....	21
2.4.4 鑑賞位置による 3D 映像の歪み.....	23
2.4 文化遺産コンテンツの 3D 映像表現.....	23
2.5 参考文献.....	25
第3章 水平面呈示型 3D 映像による文化遺産アーカイブ表現の検討.....	27
3.1 本章の目的.....	27
3.2 文化遺産向けインタラクティブ立体視ビューワーの開発.....	27
3.2.1 コンテンツの構成.....	27
3.2.2 3次元 CG モデルの生成.....	28
3.2.3 視線の設計.....	32
3.2.4 3D 映像の水平面呈示.....	33
3.2.5 ハンズ・オン展示とクロスモーダル刺激.....	34
3.2.6 ハードウェアの構成.....	35

3. 2. 7	インタラクションの構成	37
3. 3	システムの評価	41
3. 3. 1	評価方法	41
3. 3. 2	結果と考察	42
3. 4	まとめ	43
3. 5	参考文献	44
第 4 章	大規模遺跡における文化遺産アーカイビングの 3D 映像表現の検討	47
4. 1	本章の目的	47
4. 2	中国麦積山石窟	48
4. 3	3次元計測とCGモデル制作	49
4. 3. 1	3次元計測	49
4. 3. 2	CGモデル制作	50
4. 4	VRコンテンツ制作	51
4. 4. 1	VRコンテンツの構成	51
4. 4. 2	インタラクションの設計	54
4. 4. 3	3D映像表現	55
4. 4. 4	呈示システムの構成	60
4. 5	VRコンテンツの評価	61
4. 5. 1	評価用コンテンツの制作	61
4. 5. 2	評価用コンテンツの映像構成	62
4. 5. 3	評価方法	62
4. 5. 4	結果と考察	63
4. 6	まとめ	65
4. 7	参考文献	65
第 5 章	シアター型 3D 映像による文化遺産アーカイブ表現の検討	67
5. 1	本章の目的	67
5. 2	2D/3D 変換	68
5. 3	視聴位置による立体感の変化	69
5. 4	3D 映像と生理的制約	70
5. 5	シアター型 3D 映像コンテンツの制作	72
5. 5. 1	「黄金の都シカン」展	72

5. 5. 2 3D コンテンツの上映環境	72
5. 5. 3 映像資料からのコンテンツの 3D 化	73
5. 5. 4 視差角の解析と制御	77
5. 6 3D コンテンツの主観評価	81
5. 6. 1 方法	81
5. 6. 2 結果	82
5. 6. 3 考察	85
5. 7 まとめ	86
5. 8 参考文献	86
第 6 章 結論	89
謝辞	93
研究業績	95

第1章 序論

1.1 本研究の背景

近年、情報通信技術(Information and Communication Technology, ICT)の著しい発展により、インターネットや接続端末などのインフラが整備され、誰でも様々な情報にアクセスでき、流通する情報の多様化が進んできている。こうした ICT の発展を背景に、知的文化的所産のデジタル化が行われてきた。特に文化的所産については、有形無形に関わらず文化遺産をデジタルアーカイブ(Digital Archive)として集積することで、保存・観察・継承に役立てようとする取り組みが活発化している。

文化遺産を所蔵する博物館などの施設では、保護や管理の難しさ、または展示スペースの制約から公開が大幅に制限されている。元来、博物館の基本理念である収集、研究、保存、展示のうち、文化遺産を後世へ伝える「保存」と、現代の人々に広く公開し伝える「展示」は、相反する理念であり両立は困難であるとされている。そのため、「保存と展示」の両立を可能とする技術として、デジタルアーカイブが注目されている。デジタルアーカイブという言葉は、デジタルとアーカイブという二つの異なる意味を持つ言葉からなる。アーカイブとは、英語で「公文書保管所、古文書や記録文書の集合」を意味する。一般的にアーカイブという言葉が使用される際には、文書のみならず、より広義に、映像や有形無形の文化遺産などを含めた様々なものが集積されたもの、または、それらを記録・整理する活動をも意味することが多い¹⁾。デジタルアーカイブとは、端的に言えば、文書、映像や有形無形の文化遺産などが収集されたアーカイブをデジタル化する活動、または、集積されたデータそのものを指す。当然、集積されたデータは、保存するのみではなく閲覧し活用することが求められる¹⁻²⁾。坂村の”資料をデジタル化するということは「本物」の有効利用を促進することであり、同時に「本物」の無用な利用を抑制することで、「本物」を守ることにもつながる”³⁾という指摘は、デジタルアーカイブのあり方をよく表している。文化遺産は、少数の専門家のみが鑑賞するのではなく、多くのひとに公開されるべきで、その解決方法の一つとして、デジタルアーカイブを位置づけている¹⁾。デジタルアーカイブされてあれば、公開による劣化や所蔵先までの物理的な距離、展示スペースの制約といった問題は、物理的な形状を持たないデジタルデータになっているので、おおよそ解決できる。ただし、文化遺産のデジタルデータを閲覧する行為は、実物を閲覧する行為とは、得られる情報や体験といった意味で、全く異なる行為であるということに留意しておく必要がある。

デジタルアーカイブの公開する上で、目標とする方向性には、二つの異なるアプローチがあると考えられる。一つは、データベース化や並列的な情報呈示、インタラクションの追加など、実物では実現不可能なデジタル化された対象ならではの情報提供に関するアプローチであり、もう一つは、データの取得方法や呈示デバイスの高度化、呈示映像の演出効果によって、より実物に近い体験を提供するアプローチであると考えられる。

情報活用する取り組みとして、情報の検索性向上や、教育への活用、様々な情報の並列表示などがあげられる。デジタル化された情報をデータベース化することで、より実物の文化遺産に近づける取り組みとして、立体物の 3 次元形状を記録する 3 次元デジタルアーカイブや記録画像の高精細化があげられる。有形文化遺産である場合には、文化的価値の判断は、色彩情報や来歴、凹凸やフォルムなどといった形状に依存するところが大きい。高精細化や色再現性の高度化、3 次元形状をそのまま保存することのできる 3 次元デジタル化は、記録されるデータをより実物に近づけるのに有効であると考えられる。

アーカイブされた 3 次元データを閲覧するためには、より実物に近い状態を表現できる呈示環境が必要となる。ICT の発展を背景に、映像呈示デバイス分野の進歩も著しく、近年では高臨場感ディスプレイと呼ばれるデバイスが開発されている。映像を立体的に表示する 3D ディスプレイや、HD サイズ(1920×1080pixel)の約 4 倍の解像度(4096×2160pixel)を表示する 4K ディスプレイなど、高臨場感かつ高精細な表示が可能なデバイスが多く開発されている。なかでも 3D ディスプレイは、表示される対象の 3 次元形状を 3D 映像として呈示可能なため、3 次元デジタルアーカイブの呈示に適しているといえる。文化遺産の 3 次元デジタルアーカイブの呈示を、3D 映像によって表現することで、通常の 2D 映像での呈示よりも、より実物に近い体験を提供できるとともに、デジタルデータならではの演出をも行えるものであると考える。

また、2011 年 3 月 11 日に起こった東日本大震災を受けて、被災した状況などのアーカイブが盛んに行われている。その最たる取り組みとして、「東日本大震災・公民協働災害復興まるごとデジタルアーカイブ(略称:311 まるごとアーカイブ)」があげられる⁴⁾。独立行政法人 防災科学技術研究所が、中心となって推進しており、趣意書のなかで、“その目的を被災地の失われた「過去」の記憶をデジタルで再生し、被災した「現在」と復興に向けた「未来」の映像や資料をデジタルで記録し、まるごとアーカイブすること”としている。こうした失われてしまった知的所産について、様々なアプローチより、デジタルアーカイブを行うことが改めて見直されている。

1. 2 関連研究と関連分野の動向

1. 2. 1 文化遺産のデジタルアーカイビング

有形の文化遺産については、一般的に文書や写真、写真などによる記録のほか、3次元計測による形状データの記録が行われている。まず、文化遺産のデジタルアーカイブでは非破壊であることが重要なため、非接触で3次元形状を計測できる3次元レーザースキャナがよく使用される。3次元レーザースキャナとは、レーザ光を対象に照射し、その反射光を受光し、対象との距離を点群の3次元座標として計測するものである。一度に計測できる範囲は限定されているため、対象の大きさに応じて複数回計測を繰り返し、得られた点群データの位置合わせ、つなぎ合わせることで3次元CG(Computer Graphics)モデルの生成が行われる。

文化遺産の3次元デジタルアーカイブに関しては、計測精度の向上や利活用を目的とした様々な検討が行われている。先行事例としては、スタンフォード大学のデジタルミケランジェロプロジェクトが有名で、対象物の3次元計測から3次元データの閲覧に関する様々な検討が行われている⁵⁻⁶⁾。また、3次元レーザースキャナを用いた同様の事例は、日本国内でも多く報告されている。池内らは、奈良東大寺大仏やカンボジアのバイヨン寺院といった大規模な有形文化遺産をデジタル化するための計測方法や人文学的研究への応用についての検討を行っている⁷⁻⁸⁾。考古学分野でも古くから3次元レーザースキャナによる計測以外の手法を用いて、現存しない過去の文化遺産を遺跡や遺構より想定される当時の状態に復元した3次元モデルを作成し、それを用いて遺跡の環境シミュレーションなどを行ってきた⁹⁻¹⁰⁾。今日までに、3次元計測や手動によるモデリングによって、文化遺産のデジタル化は着実に進み、3次元データは蓄積されている。蓄積されたデータは、一部で一般を対象としたVRコンテンツとして展示されている¹¹⁾。しかしながら、こうして蓄積された貴重な3次元デジタルデータの活用・閲覧方法に関する研究は、未だ不十分であるといえる¹²⁾。

1. 2. 2 3Dディスプレイの原理と普及

蓄積された3次元データを有効的に利活用するためには、記録された形状情報を表示することが不可欠と考えられる。形状情報は、3D映像を利用することで呈示できる。3D映像の呈示には、3Dディスプレイが用いられる。3Dディスプレイの種類は、多種多様である

が、主に両眼視差の呈示をどのようにして行うかによって分類される(表 1.1)¹³⁻¹⁵⁾。両眼視差とは、左右の眼で得られる情報の差分であり、網膜上に結像する映像の左右眼でのズレのことをいう。人は、2つの眼が左右にはなれているため、対象を注視した際の網膜像は、注視点以外の部分で、ズレを生じる(図 1.1)¹⁴⁾。

表1.1 3D ディスプレイの分類

二眼式	スコープ型	ステレオスコープ
		ヘッドマウントディスプレイ
	メガネ型 (パッシブ)	直線偏光方式
		円偏光方式
		波長多重方式
	メガネ型 (アクティブ)	液晶シャッター方式
	裸眼型	パララックスバリア方式
レンチキュラ方式		
多眼式	裸眼型	パララックスバリア方式
		レンチキュラ方式

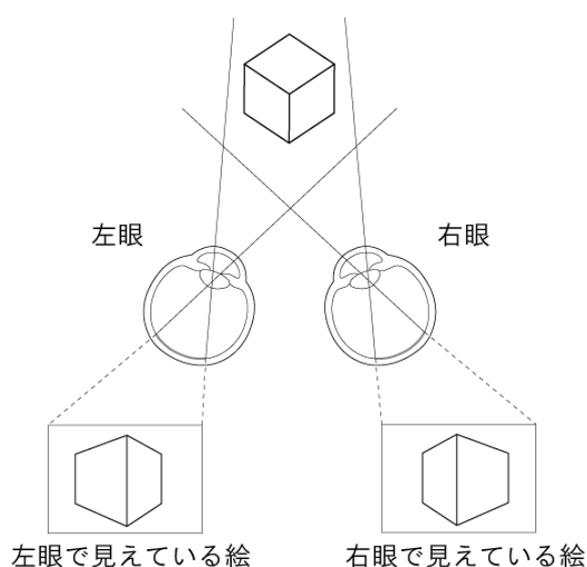


図1.1 両眼視差

3D ディスプレイは、大きく分類すると2眼式と多眼式という2つの方式に分類される。2眼式とは、左右眼用の映像を一セットとして、1視点から鑑賞を想定した3D映像を呈示する方式である。一方、多眼式とは、様々な視点方向からの鑑賞を想定した多視点分の3D映像を呈示する方式である。当然、1視点のみの表示よりも、視点数の多いディスプレイの方が、視点の自由度が高く、3D映像を表現するために高性能であると言える。しかしながら、視点数が増えるということは、ディスプレイの限られた解像度のなかで視点数分の映像を呈示する必要があるため、視点の自由度と再生される3D映像の解像感とは、トレードオフな関係となっている。

また、2眼式と多眼式の3Dディスプレイは、さらに細かくメガネ型と裸眼型に分類される。メガネ型は、文字通り3D映像を鑑賞するためにメガネを装着の必要がある方式である。対して裸眼型は、メガネの装着なしに3D映像の鑑賞が可能な方式である。当然、裸眼型は、メガネの装着が必要ないために、メガネ型と比較してユーザーに対しての負荷が少なく、映像も明るいため優れた呈示方式と言える。しかしながら、2眼式と多眼式の関係と同様に、裸眼型は、観察距離が限定されていたり、ディスプレイサイズに限界があったりと、視聴環境や呈示サイズの自由度においてトレードオフな関係にある。このことから、数人～大人数での鑑賞には、裸眼型よりもメガネ型の方が向いている方式であると言える。その他、メガネ型や裸眼型で3D映像を呈示する際に、左右眼に対して異なった映像を分離して呈示するかについて、その手法によって3Dディスプレイの種類は細分化される。2眼式と多眼式、メガネ型と裸眼型と同様に、方式によってトレードオフとなる機能や性質があるので、表示する対象によって、最適な3Dディスプレイを選択する必要がある。

3Dディスプレイの利用例というと、医療などの研究分野か、遊園地や万国博覧会のような大きなアトラクションの一部としての利用がほとんどであった。しかしながら、3D映像は一般へと浸透しつつあり、2009年に公開された映画「Avatar」の公開から始まった3D映画ブームに後押しされ、2010年以降、3D上映システムを導入している映画館が急激に増えた。また、家庭用としても3Dディスプレイの開発は盛んで、家電メーカー各社からは3D対応テレビや3D対応ブルーレイデッキが発売されている。3D表示機能を搭載した携帯電話やニンテンドー3DSが、次々に発売されるなど、3Dディスプレイは今までにない普及を遂げている。様々な種類が存在する3Dディスプレイであるが、2012年現在、家庭用に普及している3Dテレビのほとんどは、アクティブメガネ型の3Dディスプレイであり、映画館ではアクティブメガネ型やパッシブメガネ型の3D映写システムが導入されている。一方、

ゲームや携帯電話で利用されるモバイル機器の 3D ディスプレイのほとんどが、裸眼型のディスプレイが採用されている。裸眼型の 3D ディスプレイは、技術的に大型化が難しいことから、家庭用テレビへの展開はされていなかったが、2011 年 11 月に国内メーカーの東芝より 55 インチの裸眼方式の 3D ディスプレイを採用したテレビが、発売されている¹⁶⁾。

1. 2. 3 3D 映像コンテンツの普及と課題

日本国内では、2007 年 12 月から日本 BS 放送¹⁷⁾、2010 年にはスカパー！HD¹⁸⁾に始まり、各社が一般家庭に向けた 3D 放送を有料チャンネルや衛星放送を中心に開始している。その他、携帯電話向けやニンテンドー3DS 向けの 3D 映像コンテンツの配信サービスが行われている。海外でも、2010 年より欧米各国、2012 年からは中国でも 3D 放送が開始されている。特に、映画館ではハリウッド発の 3D 映画ブームに後押しされ、毎月数本ずつ 3D 映画が公開され、供給量も次第に増えてきており、以前に比べ、一般でも 3D 映像コンテンツを目にする機会は確実に増えてきているといえる。Pölonen らは、3D 映画「U2 3D」(2008)を利用して 3D コンテンツの視聴に関する印象について調査を行い、3D で表現される映像コンテンツについて、鑑賞者が肯定的に評価しているとする報告もなされている¹⁹⁾。

しかしながら、2011 年春にジーエフケー・カスタムリサーチ・ジャパン株式会社が行った 3D テレビ所有者アンケートによると、3D テレビに対して 70%以上の回答者が何かしらの不満を持っており、そのうちの過半数(53.4%)が購入時に想定よりも 3D テレビで 3D 映像をみる頻度が少ないと回答している²⁰⁾。その理由として、「3D 対応のテレビ番組が少ないので」(69.2%)、「3D 対応の映画、映像のソフトが少ないので」(59.1%)、「3D 対応のゲームが少ないので」(17.6%)とコンテンツ不足をあげる回答者が大半を占めた。

3D 映像コンテンツが、現時点でも十分な供給量を確保できていない理由として、以下のような課題が考えられる。

- 撮影・生成・編集に必要な技術的課題
- 3D 映像に関する専門知識を持った人材の不足
- 撮影期間の長期化によるコスト

- 撮影、編集機材などによるコスト

こうした問題については、制作者側の 3D コンテンツの制作方法についての様々な検討・知識の蓄積と、撮影機材メーカー側の技術的な革新などによって解決されてゆくと考えられる。

また、3D コンテンツの利活用において、制作面の課題よりのコンテンツ不足以外にも、一部では生体への安全性について危惧されるなど、課題が残されている。多くの一般ユーザーが 3D 映像を鑑賞することになった現在では、社会的に大きな問題として取り上げられる事例もある。2010 年 8 月には、消費者生活センターより「3D 映画による体調不良」についての発表がなされるなど、消費者への周知を目的に注意喚起が事業者へ求められている²¹⁾。3D 映像は、2D 映像に比べ視覚系の不整合などから視覚負担が大きいと言われており、3D 映像の生体安全性に関する国際標準化も進められている。日本国内でも業界団体により「3DC 安全ガイドライン」が策定されている²²⁾。3D 映像の視聴環境が整い、3D 映画ブームの後押しもあって、視聴者にとって 3D 映像コンテンツが一般化しつつある今、安全かつ快適な 3D 映像コンテンツの安定した供給が求められている。

1.3 本研究の目的

元来、文化遺産は保存・保管され、後世へと継承されると同時に公開をおこない、その価値を広く共有されるべきものである。しかし、後世へと継承・公開される過程において、多くの制約がある。また、保存・管理についての制約より、文化遺産は貴重なものであればあるほど、美術館や博物館の収蔵庫で永く、そして厳格に管理され、一般の人が目にする機会は少なくなってしまう。実際に文化遺産を扱える者は、研究者や所有者などのごく一部の人間に限られることが多い。また、保存・管理の観点以外でも、展示スペースに関する制約もあり、長期間、一般に公開することは難しい。さらに文化遺産の多くは、収蔵されている場所に依存し、移動の難しいものもあるほか、現在に至る前に欠損、または喪失してしまうことも多い。こうした時空間に関する制約もあるため、一般の観覧者が、目的の文化遺産を鑑賞・体験できるのは、著しく希少な機会といえる。

一方で、文化遺産をデジタル化して後世へ残す取り組みが進められており、前述の通り、一般の写真などの 2 次元資料とは異なる、形状情報をも保存可能な 3 次元デジタルアーカイブされるものも少なくない。文化遺産のデジタルアーカイブに関する研究領域にお

いては、これまで 3 次元データの構築に重点が置かれてきた。アーカイブされた 3 次元データは、様々な方法で公開が試みられているが、いまだ一般的であるとはいえ、今後は公開方法の検討も重要となると考えられる。さらに、記録されている形状データを表現できる方法での公開事例は少なく、表現可能なメディアでの公開方法の検討が必要である。

そこで本研究では、アーカイブされた形状データを呈示することのできるメディアである、3D 映像を用いた公開方法について検討を行う。具体的には、多様な文化遺産を対象にデジタルアーカイブを行い、または、既存のアーカイブ資料を使用して、対象に適した 3D 映像表現に関わる「デザイン」と「評価」について検討を行う。まず、文化遺産を 3D 映像として表現するために必要な 3 次元デジタルアーカイブの手法について検討を行う。さらに、人間工学に基づく設計と評価手法を用いて、異なる対象ごとに適した 3D 映像表現を盛り込んだコンテンツ制作と呈示システムの構築を行う。その中で、3D 映像特有の課題である映像の歪みや安全性、制作手法についても検討を行う。コンテンツ制作と呈示システムの試作から、3 次元データを利用した文化遺産デジタルアーカイブの効率的かつ効果的な 3D 映像表現に関する知見を得ることが、本研究の目的である。

1.4 本論文の構成

本論文は、上記に示した当該の問題点について、章ごとにテーマを設けて論じることとする。

第 1 章 序論

本研究の背景と、先行研究と関連分野の動向に関して述べ、その上で本研究の目的を示した。

第 2 章 文化遺産デジタルアーカイブの公開と 3D 映像表現

文化遺産のデジタルアーカイブを表現するために必要となる要素と、3D 映像表現における諸問題について論じ、本研究の位置づけを明らかにする。

第 3 章 水平面呈示による文化遺産アーカイブの 3D 映像表現

小型の文化遺産を対象として、大きさに適した 3D 映像表現とインタラクションを実装したシステムの開発を行った。中国故宮博物院の文物を対象に、水平面への 3D 映像呈示

と、2つのセンサーによる操作で、博物館での展示を想定したインタラクティブなビューワーシステムを試作した。新しい3D映像表現の試みとして、ハンズ・オン展示の展示品に「触れる」ことを意図したインタラクションについて検討を行った。また、3D映像として呈示するのに、必要かつ効率的な3次元CGモデルの生成方法についても検討を行った。

第4章 大規模遺跡における文化遺産アーカイブの3D映像表現

大型の文化遺産を対象として、大きさに適した3D映像表現とインタラクションを実装したコンテンツの制作を行った。通常では、赴くことの困難な対象として、中国麦積山石窟の選定し、3次元デジタルアーカイブと3D映像コンテンツの制作を行った。カメラの軌道やインタラクティブ操作による映像中の対象の大きさの変化や視距離に対応して、立体感が常に歪みなく、実際のサイズで文化遺産が表示されるシステムについての検討を行った。

第5章 シアター呈示による文化遺産アーカイブの3D映像表現

文化遺産を記録した、既存2D映像を利用した3D映像コンテンツ制作を行った。大人数で鑑賞するシアター型の文化遺産の解説コンテンツの制作を通して、大画面で上映するための3D映像の制約や表現方法、安全性について検討を行う。また、既存の2D映像コンテンツをもとに2D/3D変換技術で制作された3D映像と、CG映像をステレオレンダリングして制作された3D映像を組み合わせるコンテンツの制作方法と、その問題点に関して論じる。

第6章 結論

本研究で得られた知見について、総括するとともに、今後の展開について述べる。

図1.2に、本研究におけるフロー図を示す。

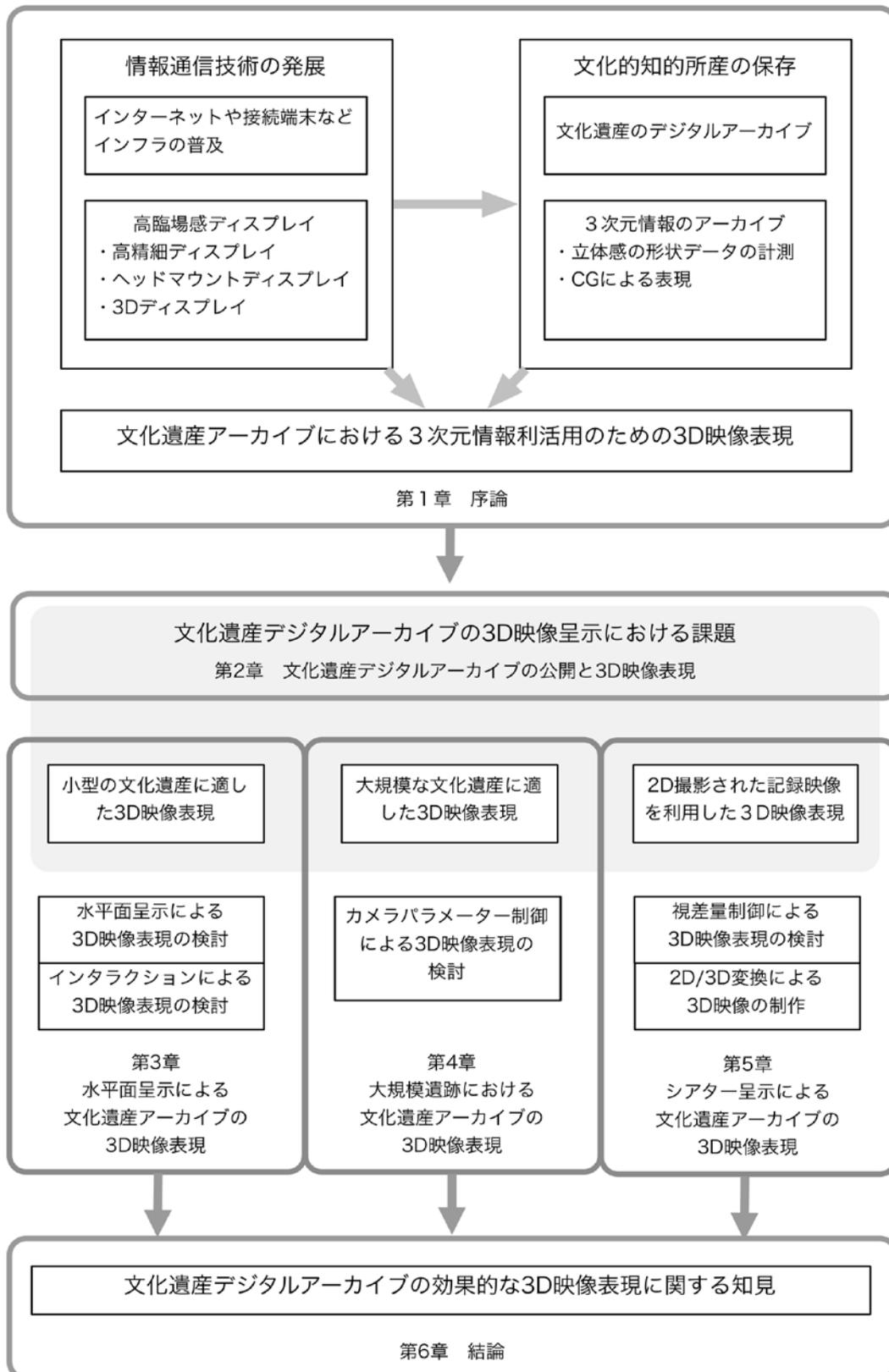


図1.2 本研究のフロー

1.5 参考文献

- 1) 笠羽晴夫：デジタルアーカイブ 基点・手法・課題，水曜社，(2010).
- 2) 笠羽晴夫：デジタルアーカイブの構築と運用，水曜社，(2004).
- 3) 坂村健：デジタルミュージアム-博物館の未来をめざして-，文化庁月報 347, pp.4-5, (1997).
- 4) 東日本大震災・公民協働災害復興まるごとデジタルアーカイブ（略称：311 まるごとアーカイブ）：<http://311archives.jp/>
- 5) The Digital Michelangelo Project：<http://graphics.stanford.edu/projects/mich/>
- 6) Marc Levoy, Kari Pulli, Brian Curless, Szymon Rusinkiewicz, David Koller, Lucas Pereira, Matt Ginzton, Sean Anderson, James Davis, Jeremy Ginsberg, Jonathan Shade, Duane Fulk：The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues, Proc. Siggraph 2000, pp.131-144, (2000).
- 7) 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).
- 8) K. Ikeuchi, K. Hasegawa, A. Nakazawa, J. Takamatsu, T. Oishi and T. Masuda: Bayon Digital Archival Project; Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual System and Multimedia, pp. 334-343, (2004).
- 9) 小沢一雅：“考古学的ビジュアライゼーション”，情報処理学会誌, Vol.43, No.10, pp. 1046-1069, (2002).
- 10) 千原 國宏，金谷 一朗：“情報考古学：遺跡・遺物のデジタルアーカイブ”，日本バーチャルリアリティ学会誌 Vol.8, No.1, pp. 6-9, (2003).
- 11) 凸版印刷株式会社 VR 等文化事業：<http://www.toppan-vr.jp/bunka/>
- 12) 門林理恵子：文化遺産の3次元デジタルアーカイブの利用の現状と課題；O plus E, Vol.27, No.10, pp.1122-1127, (2005).
- 13) 原島博，元木紀雄，矢野澄男：3D 映像表現の基礎，オーム社，(2000).
- 14) 河合隆史，盛川浩志，太田啓路，阿部信明：3D 立体映像表現の基礎，オーム社，(2010).
- 15) 泉武博：3次元映像の基礎，オーム社，(1995).
- 16) 東芝 REGZA 55X3：http://www.toshiba.co.jp/regza/lineup/x3/index_j.htm

- 17) 日本 BS 放送 : <http://www.bs11.jp/3d/>
- 18) スカパー！HD : <http://www.skyperfectv.co.jp/>
- 19) Monika Pölonen: Subjective measures of presence and discomfort in viewers of color-separation-based stereoscopic cinema, *Journal of the SID* 17/5, pp.459-466, 2009
- 20) ジーエフケー・カスタムリサーチ・ジャパン株式会社:「3D テレビに関する調査」, <http://www.gfk.com/imperia/md/content/gfkcustomresearchjapan/pdf/files/3dtvstudy.pdf>
- 21) 国民生活センター: 3D 映画による体調不良についての発表 (2010 年 8 月 4 日), http://www.kokusen.go.jp/news/data/n-20100804_2.html
- 22) 3D コンソーシアム安全ガイドライン部会: 人に優しい 3D 普及のための 3DC 安全ガイドライン(2010 年 4 月 20 日改訂, 国際ガイドライン ISOIWA 準拠), (2010).

第2章 文化遺産デジタルアーカイブの公開と3D映像表現

2.1 はじめに

文化遺産のデジタルアーカイブにおいては、現存する資料をデジタル化する取り組みが、近年、有形無形を問わず著しく進んでいる。第1章で述べたように、有形の文化遺産をデジタル化するための計測技術については多くの先行研究がなされ、文化遺産の3次元データが蓄積されている。対して、蓄積されたデータの利活用としての公開方法などについて検討した研究は多くない。文化遺産デジタルアーカイブされたデータの究極の出力方法としては、実物と全く同じ体験のできるモノを、スペースや素材の劣化などなく呈示できることであろうと考えられる。これは実物と同じ体験という意味では、同じ素材を使ったレプリカを制作することで実現可能であり、旧来より行われており、美術・歴史教育の中でよく使われている。しかしながら、レプリカ制作にはコストがかかるとともに、型を作るためにオリジナルである文化遺産に損傷を与える危険性がある。当然、保管するにも展示するにも、実物と同じだけのスペースを必要となる。そのため、多くの文化遺産を対象に、一般向けの公開まで念頭においた、文化遺産のデジタルアーカイブとその公開手法としては、妥当ではない。

そこで、デジタル化されている利点を生かした公開方法を考える必要がある。実物に近い体験を可能とし、より多くの情報を呈示できる可能性がある映像メディアとして、3D映像があげられる。特に、3次元デジタルアーカイブを公開する上で、3次元情報を有しているアーカイブであれば、3D映像呈示デバイスを用いた公開法は有用であると考えられる。3D映像での呈示であれば、当然、物理的なスペースを取ることはないし、形状情報の呈示も可能である。しかし、文化遺産の3次元デジタルアーカイブを3D映像での公開方法についての検討は、今までに盛んに行われてきておらず、わかっていることは少ないといえる。

そこで本章では、文化遺産の3次元デジタルアーカイブの取り組みについて利活用に関する先行研究について述べ、その中で3Dディスプレイを利用した事例について述べる。さらに3D映像については、2D映像とは異なる課題が知られているため、その原理について解説し、文化遺産を3D映像表現によって公開する際の課題点を抽出し、当該分野における本研究の位置づけを明らかにする。

2.2 文化遺産の3次元デジタルアーカイブの利活用に関する先行研究

文化遺産の3次元デジタルデータの活用方法として、川口らは四川省の複数の石窟の3次元計測を行い、得られたCGモデルを石窟ごとにスケールを単一化した後、形状の比較を行い美術史的な検証に利用している¹⁾。鎌倉らも、大規模なカンボジアアンコール遺跡として知られるバイヨン寺院を3次元計測している²⁾。バイヨン寺院は、多数の塔を持つ構造でそれぞれの四面に彫刻が施されている。各彫刻の形状について解析を行い比較することで、人

文学的調査による分類の正当性を明らかにするとともに、形状が類似する彫刻の分類を寺院の地図にマッピングすることで、制作グループ編成や担当領域など推定できるなど、制作時の状況を知る可能性を示している。

盛川らは、CT(computed tomography)による断層画像から、仏像の内部構造を可視化する取り組みを行っている³⁾。仮想空間内に3次元モデルとして構築された木彫仏のパーツを編集することで、仮想的に修復を行っている。実際には、バラバラの状態で見つされた仏像を、仮想空間内でそれぞれのパーツを組み合わせて本来の姿に修復を行った。さらに、欠損した箇所や亡失してしまったパーツについても、仮想空間内での3次元モデルの編集によって復元し、本来の像の姿を再現することができた。しかし、修復を行う作業者は仏像修復の専門家であり、3次元モデル操作やバーチャルリアリティ技術の使用経験がほとんどない。そのため、より直感的な操作を可能とする3次元の反力フィードバック機構を備えるインタフェースシステムを用いて、修復作業者は実際に仏像に触れているのと同じ反力を感じながら修復を行っている。構築したコンテンツを利用することで、実際には手を加えることができない文化遺産に対しても修復を行い、文化遺産の作成時の姿を復元している(図2.1)。

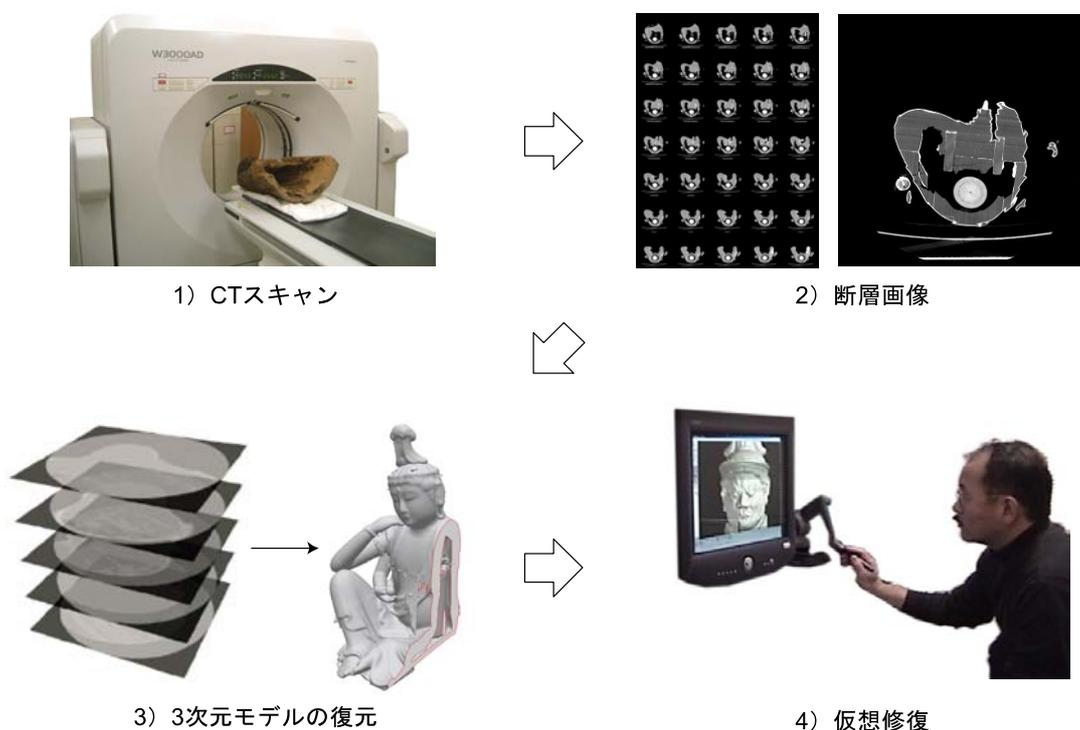


図2.1 仏像の仮想修復の流れ

現存する文化遺産を3次元デジタルアーカイブして、利用する取り組みの他、現存しない

文化遺産についても3次元デジタル化して利用する取り組みも行われている。大石らは、奈良東大寺の大仏の3次元デジタルアーカイブを行っている⁴⁾。奈良の大仏は、度重なる戦火や天災によって、再建、修復が行われており、創建当初とは異なる形状となっている。3次元CGモデルを文献に残る創建当初の大仏の法量データに合わせ、変形することで創建当初の大仏の復元を行っている。角田らは、現存しない奈良飛鳥京を3次元CGで復元し、複合現実感技術(MR: Mixed Reality)を用いて遺構の現在の風景に合成表示を行うシステムを開発している⁵⁾。復元CGには陰影表現によるリアリティの高い演出を行うことで、既に失われている対象に対しても、より高い現実感やおもしろさを高める効果があることが示されている。

また、安藤らは、一般を対象としてコパン遺跡をCGモデルで再現し、VR(Virtual Reality)コンテンツを制作し、シアター型とホーム型の両環境を並列に使用できる学習システムを構築し、学習支援効果について検証を行っている⁶⁾。文化遺産の3次元デジタルデータを利用することで、従来の映像メディアでは得られない高い没入感と臨場感によって対象とする文化遺産への興味を喚起するのに有効なことを示している。鎌倉らもまた3次元デジタルアーカイブされたロダンの彫像「考える人」を利用してコンテンツ化を行っている⁷⁾。Web上での閲覧や小型の映像端末での閲覧を対象としたコンテンツ制作を通して、文化遺産の興味や理解の度合いを向上させるために教育利用に関して、有用性がきわめて高いことを検証している。また、3次元デジタルアーカイブを積極的に展示利用する取り組みも、デジタルミュージアムなどと呼ばれる形で実現されている。なかでも、3次元デジタルアーカイブしたデータを映像として鑑賞することに重点を置いた試みとして、凸版印刷による文化資産の3次元モデルを利用した高精細なVRコンテンツが知られている。博物館の展示に併設される大型のスクリーンで、一般へ公開されており、実施例も中国故宫博物院や奈良唐招提寺、ナスカの地上絵など多岐にわたる⁸⁻⁹⁾。

しかし、こうした3次元計測されたデータを展示映像として呈示する取り組みにおいても、3次元情報を有するデータの閲覧に適した3D映像が用いられることは少なく、通常の2D映像での閲覧のみにとどまることが多い。3次元デジタルアーカイブについて、研究・教育という側面から考えると、自由な視点からの観察、光源や環境のシミュレーションなど、実物にはない利点を多く併せ持っており、2D映像での閲覧のみでも大きな意義を持つと思われる。しかしながら、文化遺産を鑑賞するといった観点より、3次元デジタルアーカイブを再考すると、2D映像のみでの鑑賞では、文化遺産のもつ魅力を十分に表現できているとは言い難い。

2. 3 文化遺産アーカイブの3D映像呈示に関する先行研究

有形文化遺産においては、その形状情報を伝えるため、3D映像による文化遺産の表現が適していると考えられるが、その事例は多くない。河合らは、世界遺産である奈良薬師寺の薬

師三尊像¹⁰⁾や、スペインの修道院¹¹⁾の 3D 映像コンテンツを制作し、その造形や建築様式などを空間として表現するための検討を行っている。現地で録音されたバイノーラル 3D サウンドや、薬師三尊像のコンテンツではお堂で炊かれるお香の香りを同時に呈示するなど可能なかぎり、雰囲気再現を行っている。これらは、3 次元デジタルデータを利用したものではなく、実際の文化遺産を 3D 映像で撮影し、コンテンツ化したものである。

また、盛川らは、奈良平城宮遺跡を対象として、強化現実技術を活用した「フィールドミュージアム」の提案を行っている(図 2.2)¹²⁾。これは、実際の風景と CG で復元された建築とを、リアルタイムに 3D 映像で合成して呈示するシステムである。3D 映像で呈示を行うことで、コンテンツへの興味引かれるといったもの、建造物の実際の大きさを感じられるといった評価から、文化遺産閲覧への有効性が示唆されている。



図2.2 ディスプレイを通して見える映像

われわれも、喪失してしまった文化遺産を 3 次元デジタルアーカイブする取り組みを行っている。2003 年の地震で崩壊してしまった、ユネスコの世界危機遺産であるイランのバム遺跡を対象として、地図、写真、ムービーや計測図面など様々な資料のデータベース化と、3 次元 CG による遺跡の復元と体験型の VR コンテンツの制作を通して、現存しない文化遺産に対する 3 次元デジタルアーカイブ手法について検討した(図 2.3)¹³⁻¹⁴⁾。多岐にわたる資料を収集し、建築分野の専門家を交え、イラン、日本、フランスの 3 カ国の研究機関でデータを共有し、3 次元 CG もでるによって失われた遺跡の復元を試みている。3 次元計測などは行われておらず、数少ない資料によりモデリングし、合理的に管理・共有するための手法について検討した。また、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)や全周囲型ディスプレイの CAVE を用いて、立体視

しながら再現されたバム遺跡内をウォークスルー可能な VR コンテンツの試作を行った¹⁵⁻¹⁶⁾。
 しかしながら、3D 映像表現については詳細に検討を行っておらず、3D 映像で呈示するため
 に必要な表現とその効果について、検討する必要がある。

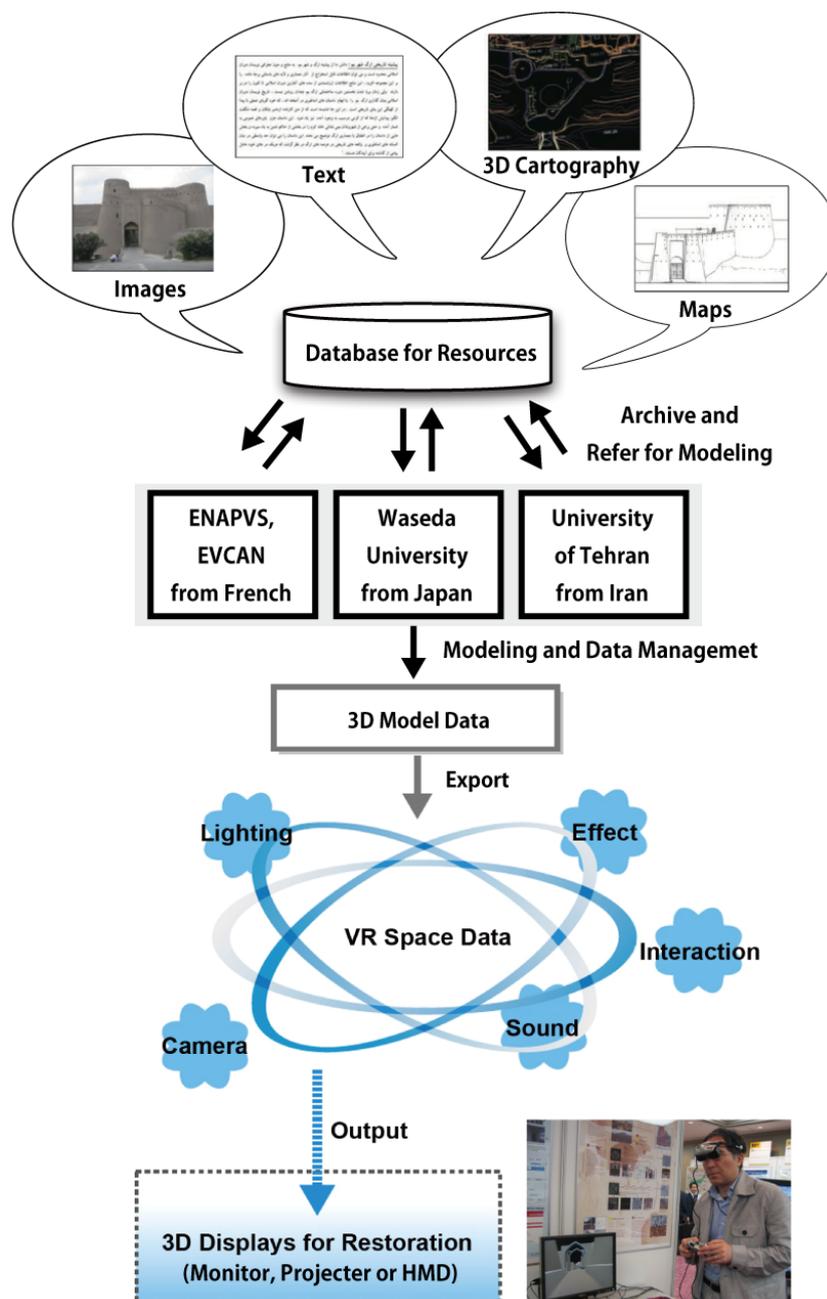


図2.3 イランバム遺跡の復元コンテンツ制作のワークフロー

先行研究より、3D カメラによる 3D 映像生成や、VR 空間上で仮想復元された遺跡を 3D 映像で、記録・体感する試みは行われており有効性については示されているが、その事例は少

ない。3次元デジタルアーカイブされた3次元データを3D映像によって公開するためには、その制作過程や3D映像表現について検討する必要があると考えられる。

2.4 3D映像表現

文化遺産を3D映像で呈示するためには、一般的な3D映像コンテンツについて、3D映像で呈示される原理やその表現方法、課題点について明らかにしておく必要がある。

2.4.1 3D映像の原理と立体情報

人が奥行き感を知覚するためには、両眼を通して得られる立体情報を手がかりとしている。立体情報は、単眼立体情報と両眼立体情報の2つに大きく分類される。その名称の通り、単眼立体情報は単眼でも得られる立体情報であり、両眼立体情報は両眼でのみ得られる立体情報である。視覚系が利用している、主な立体情報を分類別に表2.1に示す¹⁷⁻¹⁸⁾。

テレビや映画館で流れる2D映像を見ているときでも、物体や空間に立体感を感じることができるのは、映像中に隠蔽や運動視差、線透視、陰影などに代表される単眼立体情報が含まれているからである。一般的に、3D映像を呈示するために3Dディスプレイなどで利用されている立体情報は、通常の2D映像では呈示することの出来ない、両眼立体情報の両眼視差である。

表2.1 視覚系の利用している立体情報

	単眼立体情報	両眼立体情報
網膜像による手がかり	隠蔽 相対的サイズ きめの勾配 視野内の高さ 空気透視 線透視 運動透視 運動視差 陰影	両眼視差
筋肉制御系の手がかり	調節	輻湊

両眼視差は、視角で360度分の1に相当する約10秒のわずかなズレ量でも検知すること

ができるとされている¹⁹⁾。そのため数メートル離れた前後位置は、センチメートル単位で、数十メートルでもメートル単位で、その前後関係を識別することができる。さらにこの両眼視差は、10m 以内できわめて重要な立体情報であり、100m を超える範囲まで有効であるとされる²⁰⁾。その原理から、形状情報を伝えるために重要な役割を果たすが、有効範囲が人の手元から10m 以内であることから、両眼視差が有効な対象の大きさは限定される。建築などの大型構造物や風景などの全景を両眼視差情報によって、立体感をとらえることは不可能である。そうした大きな対象については、対象までの距離に応じて、視野内の高さや空気透視を利用して立体感を得ている(図 2.4)。しかしながら、両眼視差による形状情報の把握のような、緻密な形状情報ではない。

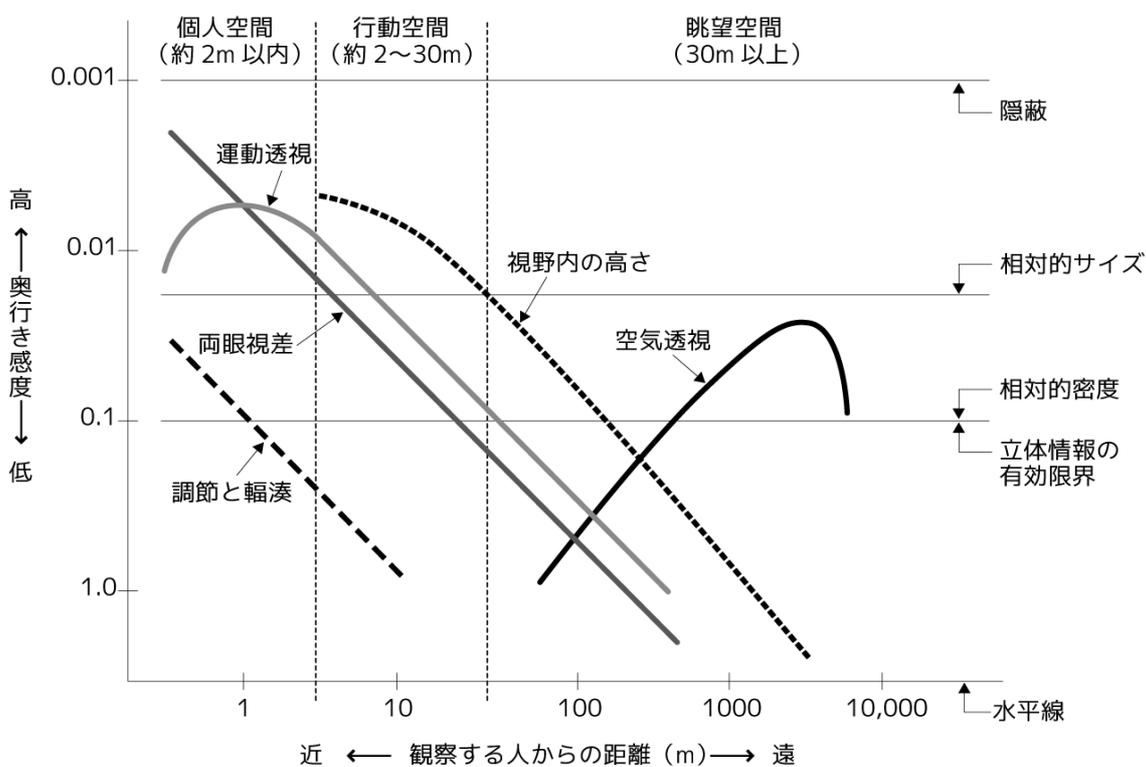


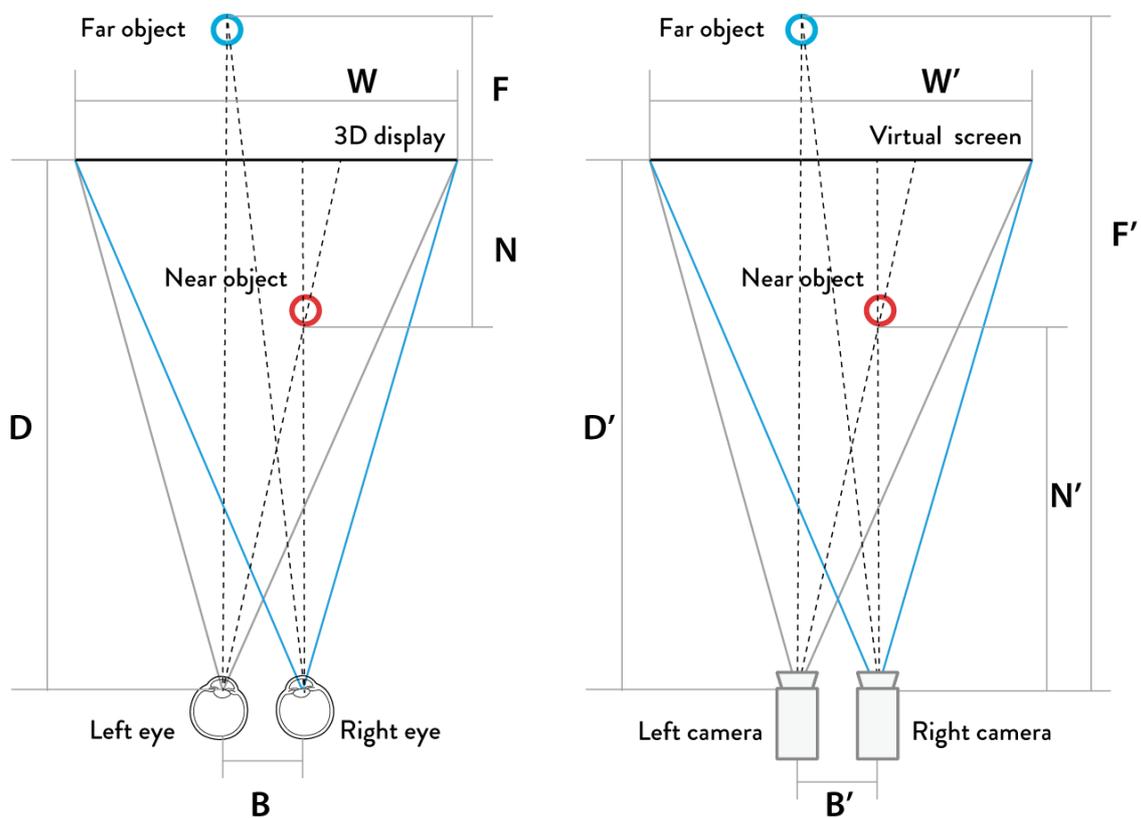
図2.4 各立体情報の奥行き感度 (Cutting and Vishton, 1995)

また、両眼視差による人が知覚する立体像は、撮影された条件や鑑賞する環境によって、その形状についてさまざまな歪みを生じることが知られている²¹⁻²²⁾。

2. 4. 2 3D 映像における立体感の再現性

3D 映像によって、対象の形状情報を正しく表現するためには、ラウンドネスファクター (Roundness factor) を考慮する必要がある²³⁾。ラウンドネスファクターとは、3D 映像で表示さ

れている対象の立体感の再現性を表すための指標である。撮影された実物の立体感(r)に対する、再生される 3D 映像の立体感(r)の係数(R)で表される(式 1) (図 2.5)。このとき、実物の立体感(r)は、撮影した際の最も近い対象までの距離と最も遠い対象までの距離、仮想スクリーン面の幅によって求められる(式 2)。仮想スクリーン面とは、3D 映像の呈示する際のスクリーン面までの距離での投影面となる。再生される 3D 映像の立体感(r)は、もともと飛び出した対象までの距離ともっとも奥の対象までの距離、呈示する 3D ディスプレイの幅によって求められる(式 3)。



B: 瞳孔間隔

D: 視距離

N: 最も飛び出している部分

F: 最も奥の部分

W: スクリーン横幅

B': カメラ間隔

D': 仮想スクリーンまでの距離

N': カメラから最も近い部分

F': カメラから最も遠い部分

W': 仮想スクリーン横幅

図2.5 3D 映像呈示条件と撮影条件

$$R(\text{ラウンドネスファクター}) = \frac{r(\text{3D 映像の立体感})}{r'(\text{実物の立体感})} \quad (\text{式 1})$$

$$r'(\text{実物の立体感}) = \frac{(D'-N')+(F'-D')}{W'} \quad (\text{式 2})$$

$$r(\text{3D 映像の立体感}) = \frac{N+F}{W} \quad (\text{式 3})$$

ラウンドネスファクター (R) が 1 であれば、実物の立体感が正しく再現されており、実物の形状情報が正しく表現できていると言える。逆に、ラウンドネスファクターが 1 と等しくならないのであれば、実物の形状情報は正しく表現できていないと言える。具体的には、1 よりも大きい場合は、前後に誇張された立体感となり、1 よりも小さい場合は前後に圧縮された立体感となる (図 2.6)。よって、対象の形状情報を保った 3D 映像を呈示するには、カメラのアングルや視聴環境など様々な状況に応じて、ラウンドネスファクターが 1 に近似する値を常に維持できるようにする必要がある。

3D 映像を撮影するための画角が原因で、ラウンドネスファクターが著しく乏しい場合には、書き割り現象が発生してしまう可能性もある²²⁾。書き割り現象は、望遠レンズで撮影された映像で発生することが多く、対象が舞台美術の書き割りのように立体感を失ってしまい、3D 映像としては魅力に欠け、現実の形状とは乖離した表現となってしまう。



図2.6 ラウンドネスファクターによる立体感の違い

2. 4. 3 3D 映像の演出と設計

近年の 3D 映像制作の現場では、デプスバジェット (Depth budget) やデプススクリプト (Depth script)、デプスチャート (Depth chart) という用語が聞かれるようになってきた^{18,23)}。どちらも作品の立体感を設計するために用いる用語である。デプスバジェットとは、呈示条件

に応じて決定される 3D 映像の再生可能な範囲のことである。同時に、制作において使用可能な視差量の基準として使用されている。デプススクリプトとは、作品のストーリー展開に応じて決定される立体感の強弱の時系列的な変化のことである。奥行き、飛び出しなど立体感の強度を統合的に表したもので、3D 映像表現の演出として、立体感の強弱を制御するために使用する。デプスチャートは、デプススクリプトを定量的に解釈するために用いられる。奥行き方向と飛び出し方向の視差量を記録したものである(図 2.7)。

3D 映像作品などでは、こうしたデプスバジェット、デプススクリプトの設計を行い、立体感の強弱によるメリハリが、制作した作品の中でどのように推移しているかを、デプスチャートで確認するなど行われている。冒頭で立体感を強めにつけ、ストーリーの中盤では立体感を押さえ落とし、終盤でリズムよく立体感を強めてゆくなど、シーンに応じた立体感の演出を行う。3D 映画などでは、こうしたシーンごとの演出の必要性和、撮影や視聴環境の制約によって、ラウンドネスファクターが 1 で形状が正しく表現されている状態が最良としておらず、デプススクリプトによって立体感を誇張したり、弱めたりといったメリハリを演出として制御している。

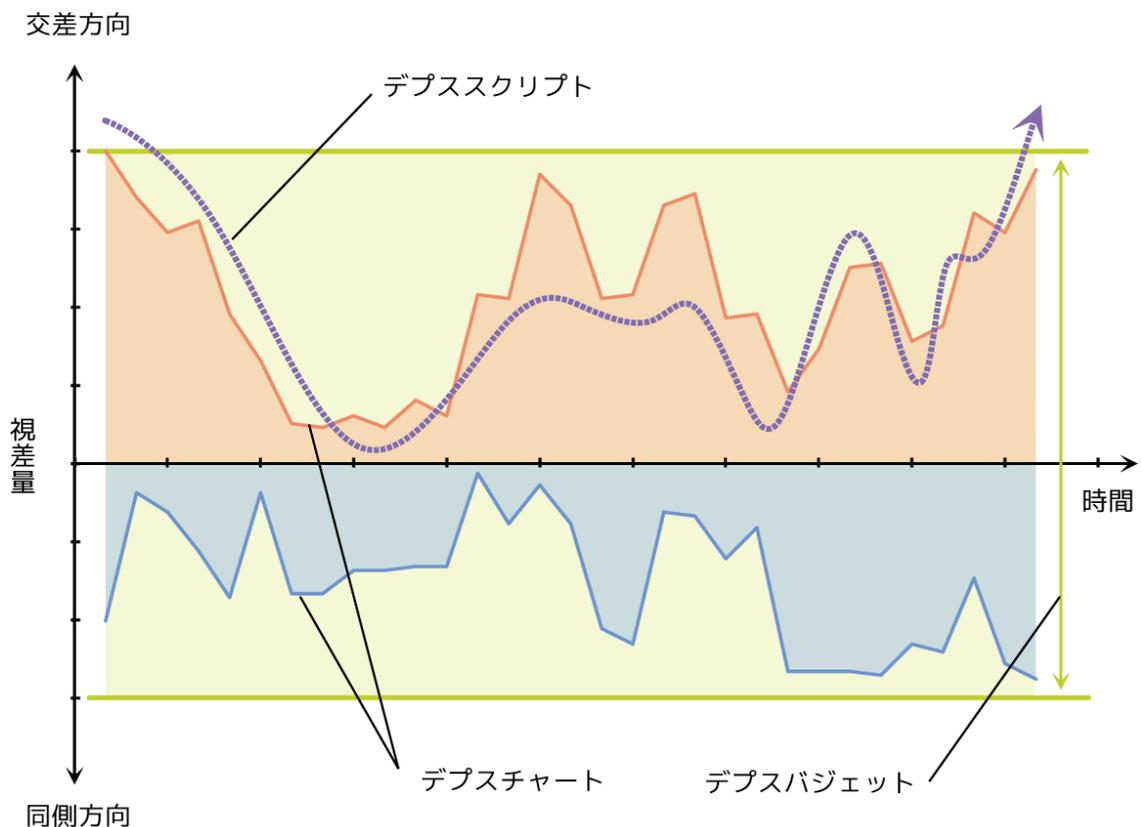


図2.7 時系列の立体感 (デプススクリプト)

2. 4. 4 鑑賞位置による 3D 映像の歪み

3D 映像は、鑑賞位置によって再生像に歪みを生じることが知られている²⁴⁾。通常の 3D 映像は、スクリーン面に対して真正面で最適な距離で鑑賞する場合に、制作者が意図した正しい再生像を結ぶように設計されている(図 2.8)。再生像は、スクリーンに呈示される左右眼用の映像と左右眼とを結ぶ基線が交差する位置に再生されるため、基点となっている左右眼の位置(鑑賞位置)がずれると形状が歪む。例えば、鑑賞位置がスクリーンに向かって左方向にずれた場合には、交差方向で左方向に、交差方向の右方向に、再生される 3D 映像は歪むこととなる(図 2.9)。また、前後方向への鑑賞位置の変化でも、再生される 3D 映像は歪み、立体感が増減する。鑑賞位置が前方にずれた場合には立体感は減衰し、後方にずれた場合には立体感は増大する。

正しい再生像を融像できる範囲はごく狭いので、実際には映画館などでも多くの人が、少なからず歪みの含んだ 3D 映像を鑑賞していることになる。3D 映像コンテンツを鑑賞した際の座席位置に関する影響についての報告は少ない。

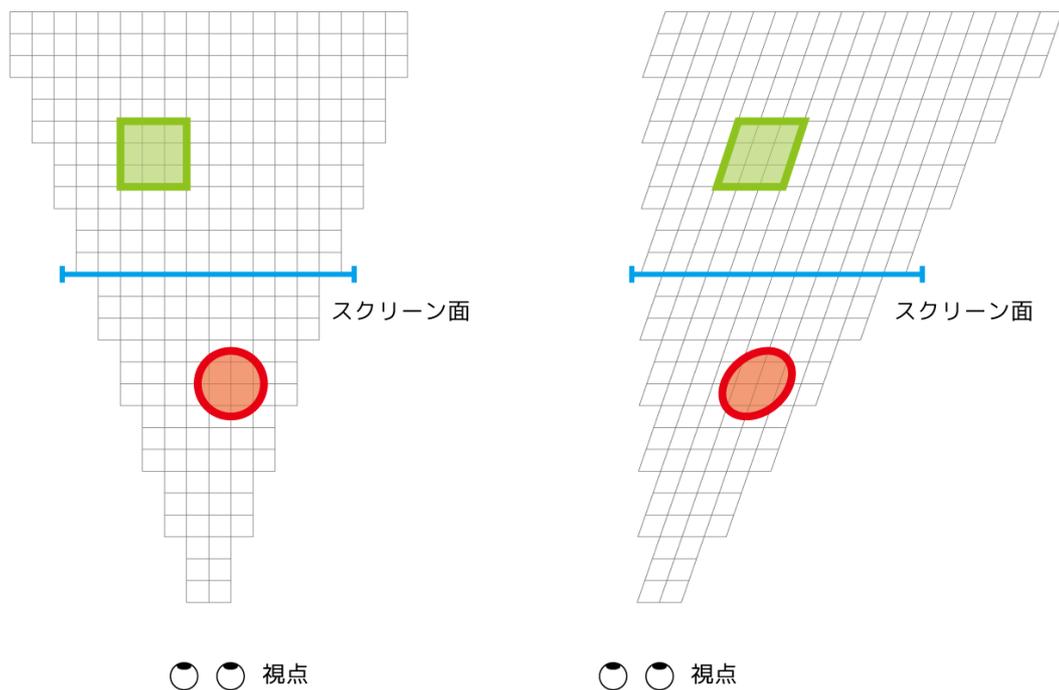


図2.8 正面から鑑賞する 3D 映像

図2.9 ズれた位置から鑑賞する 3D 映像

2. 4 文化遺産コンテンツの 3D 映像表現

文化遺産は、3次元デジタルアーカイブされることで、利活用できる範囲が広げることができる。しかし、文化遺産をデジタル化する計測手法についての研究やデータの蓄積についての

取り組みと比較して、取得された 3 次元データの利活用に関する検討は数が少ない。今までの先行研究によっても、人文学的研究の仮説の検証や新たな視点の提供に役立つだけでなく、教育効果や興味の喚起に有効であることが示されている。また、こうした文化遺産の 3 次元デジタルアーカイブを 3D 映像で呈示することで、2D 映像での呈示よりもより形状や大きさの把握を即す効果が期待できることが、先行研究より示されている。しかしながら、文化遺産を 3D 映像で呈示する取り組みは、十分になされておらず、3D 映像で表現されることで得られる効果と影響については、未だ明らかにされていない部分が多い。

文化遺産の 3D 映像コンテンツは、他の一般的な 3D 映像コンテンツとは異なり、鑑賞者に対して文化遺産の形状情報を正しく伝えることが、もっとも重要な課題であると考えられる。鑑賞者へ正しい形状情報を呈示するためには、再生される 3D 映像の立体感について再現性を高める必要がある。一般的な 3D 映像作品では、デプスバジェットやデプススクリプトなどを考慮した演出を行う上で、意図して実物との立体感が一致しない場合や、撮影条件や視聴環境のために実物との立体感を一致できない場合などある。文化遺産アーカイブを 3D 映像表現する際には、実物と異なった立体感で形状情報を呈示することは好ましくないため、常に実物に近似した立体感を再現するために、ラウンドネスファクターをコントロールする必要がある。また、大きなスクリーンや多人数で、3D 映像コンテンツを鑑賞する際には、視聴する位置によってそれぞれ形状情報に差異が生じるため、印象が異なってしまう可能性もある。しかしながら、3 次元デジタル化された文化遺産は、物理的な制約受けないためないため、自由度の高い 3D 映像表現が可能であると考えられるため、上述の課題を解決できる設計について検討する必要がある。併せて、文化遺産を 3D 映像で呈示する際に、対象の大きさや呈示する環境の規模によって適した 3D 映像表現についても、明らかとなっていないので検討が必要である。

また、3 次元デジタル化した文化遺産を操作し、触れるといった表現が映像コンテンツで可能となれば、レプリカで問題となる物理的なスペースやコストの問題をも解決できる。3 次元デジタルアーカイブの出力方法の理想を実現するためには、インタラクションや 3D 映像表現によって、文化遺産を操作している感覚や触れているといった感覚を実現できないか検討が必要である。3D 映像を呈示するための 3D ディスプレイについては、3D メガネを着用することは、さまざまなアンケートでユーザーの不満としてよく聞かれる項目であり、裸眼方式の 3D ディスプレイでは、3D メガネ着用による不満が解消されるので、ユーザーからの期待は大きい。しかしながら、映像の精細度などの観点より、現在入手できる裸眼方式の 3D ディスプレイは文化遺産の表示には適しているとは言えない。そこで本研究では、メガネ型の 3D ディスプレイを主に使用することとする。

2. 5 参考文献

- 1) Mami Kawaguchi, Hiroyuki Morikawa, Takashi Kawai, Tamami Hamada, Romi Hida : "3D Scanning and Use of Digital Data in Study of Grottos in Sichuan, China", Proceedings of the 10th International Conference on VIRTUAL SYSTEMS and MULTIMEDIA, pp. 179-187 (2004)
- 2) 鎌倉真音, 大石岳史, 高松淳, 池内克史, “3次元モデルによるバイヨン寺院尊顔の解析と制作背景の考察”, 映像情報メディア学会誌, Vol.61, No.4, pp. 502-507 (2007).
- 3) Hiroyuki Morikawa, Mami Kawaguchi, Takashi Kawai, Yusuke Sakuraba, Katsuaki Ohashi : "Virtual restoration and analysis of important cultural properties using 3D model constructed by X-ray CT", Proceedings of the 10th International Conference on VIRTUAL SYSTEMS and MULTIMEDIA, pp. 201-208 (2004)
- 4) 大石岳史, 増田智仁, 倉爪亮, 池内克史, "創建期奈良大仏及び大仏殿のデジタル復元," 映像情報メディア学会誌, Vol. 62, No. 9, pp. 1466-1473, (2008).
- 5) 角田哲也, 大石岳史, 池内克史, "高速陰影表現手法を用いた飛鳥京MRコンテンツの開発とその評価," 映像情報メディア学会誌, Vol. 62, No. 9, pp. 1466-1473, (2008).
- 6) 安藤真, 吉田和弘, 谷川智洋, 王燕康, 山下淳, 葛岡英明, 廣瀬通孝: スケーラブル VR システムを用いた教育用コンテンツの試作 マヤ文明コパン遺跡における歴史学習; 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol.8, No.1, pp. 65-74, (2003).
- 7) 鎌倉真音, 角田哲也, 池内克史, 青柳正規: デジタルコンテンツの教育利用 ロダン彫刻『考える人』3次元デジタルアーカイブデータを用いて; 映像情報メディア学会誌, Vol.62, No.2, pp. 173-176 (2008).
- 8) 加茂竜一, “デジタルアーカイブと VR 表現”, 情報処理学会誌, Vol.43, No.10, pp.1052-1057, (2002).
- 9) 三枝太, 吉野弘一, “バーチャルリアリティ「ナスカ」のコンテンツ開発”, 映像情報メディア学会誌, Vol.60, No.12, pp.1889-1892, (2006).
- 10) Takashi Kawai, Hidenobu Takao, Tetsuri Inoue, Hiroyuki Miyamoto, Kageyu Noro, “Virtual museum of Japanese-Buddhist temple features for intercultural communication”, Proc. of SPIE, 3295, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems V, pp.144-147, (1998).
- 11) Takashi Kawai, Takashi Shibata, Takayoshi Mochizuki, Kageyu Noro, "Production of stereoscopic 3-D movies of a Spanish monastery for a digital archive," Proceedings of SPIE, 3957, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VII, 284-287, (2000).

- 12) Hiroyuki Morikawa, Mami Kawaguchi, Takashi Kawai, Jun Ohya, "Development of a stereoscopic 3D display system to observe restored heritage", Proc. of SPIE, 5291, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI, pp.415-422, 2004
- 13) 小野欽司, Elham ANDAROODI, Alireza EINIFAR, 阿部信明, M. Reza MATINI, Olivier BOUET, Frank CHOPIN, 河合隆史, 北本朝展, 伊藤朝香, Eskandar MOKHTARI, Saeed EINIFAR, Mohammad Seyyed BEHESHTI, Chahryar ADLE, "世界危機遺産バム城塞の 3 次元 CG 復元とバーチャルリアリティ", Progress in informatics : PI 5, pp.99-136, (2008).
- 14) Elham ANDAROODI, M. Reza MATINI, Nobuaki ABE, Kinji ONO, Asanobu KITAMOTO, Takashi KAWAI, Eskandar Mokhtari, "Simultaneous Implementation of Heterogeneous Data for 3-D Reconstitution of the UNESCO World Heritage in Danger: Arg-e-Bam", 人文科学とコンピュータシンポジウム じんもんこん 2007, pp. 265-270, (2007).
- 15) M. R. Matini, E. Andaroodi, H.Y. Yoon, N. Abe, A. Kitamoto, T. Kawai, K. Ono, "Virtual 3DCG of the Citadel of Bam", Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology 2009 Demo paper, CD-ROM, (2009).
- 16) 尹夏英, 阿部信明, 河合隆史, 井上哲理, エルハム・アンダローディ, モハメド・レザ・マティーニ, 小野欽司, "バーチャル遺産における人物配置と印象の変化", 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol.15, No.2, pp.203-212, (2010).
- 17) 原島博, 元木紀雄, 矢野澄男: 3D 映像表現の基礎, オーム社, (2000).
- 18) 河合隆史, 盛川浩志, 太田啓路, 阿部信明: 3D 立体映像表現の基礎, オーム社, (2010).
- 19) 泉武博: 3次元映像の基礎, オーム社, (1995).
- 20) 長田昌二郎: 視角の奥行き距離情報とその奥行き感度, テレビジョン学会誌, vol.31, no.8, pp. 649-655, (1977).
- 21) 山之上裕一, 永山克, 尾藤峯夫, 棚田詢, 元木紀雄, 三橋哲雄, 羽鳥光俊: 立体ハイビジョン撮像における左右画像間の幾何学的ひずみの検知限・許容限の検討, 電子情報通信学会論文誌 D-II, J80-D-2(9), pp.2522-2531, (1997).
- 22) 山之上裕一, 奥井誠人, 岡野文男: 2眼式立体画像における箱庭・書き割り効果の幾何学的解析, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.25, No.48, PP.15-22, (2001).
- 23) Bernard Mendiburu: 3D Movie Making: Stereoscopic Digital Cinema from Script to Screen, Focal Press, (2009).
- 24) Woods,T. Docherty,R. Koch, "Image distortions in stereoscopic video systems", SPIE, Vol.1915, pp.36-48, (1993).

第3章 水平面呈示型 3D 映像による文化遺産アーカイブ表現の検討

3. 1 本章の目的

本章では、3次元スキャナーによる計測でアーカイブされる小型の文化遺産の3次元デジタルデータを、効率的かつ効果的に閲覧するシステムの開発について述べる。まず、小型の文化遺産について、3D映像表現するために必要な3次元デジタルデータの効率的な制作方法について検討を行った。具体的には、デジタル化する対象について、3次元計測とCG(Computer Graphics)ソフトウェアによるマニュアルモデリングによるCGモデルの生成を行い、それぞれ得られた3次元デジタルデータの比較検討をした。その上で、小型の文化遺産を一般へ公開し、閲覧するために、対象とした文化遺産のサイズに最適な3D映像表現について検討を行った。また、一般を対象とするため、観察者が自ら操作し、自由に文化遺産を体感できるような直感的なインタラクティブ性を考案し、システムに実装した。試作したシステムの評価を行うことで、3次元デジタルアーカイブされた文化遺産のデータの3D映像による効果的な公開方法に関する知見を得ることを目的とした。

3. 2 文化遺産向けインタラクティブ立体視ビューワーの開発

3. 2. 1 コンテンツの構成

閲覧する文化遺産は、中華人民共和国の故宮博物院¹⁾に収蔵されている文物より選んだ。故宮博物院は、皇帝の宮殿であった紫禁城内で美術品などを公開する博物施設である。明朝、清朝の皇帝ゆかりの100万点に及ぶ工芸品や美術品などの文物を収蔵している。しかし、保護・管理や展示スペース上の制約より、一般に公開されるものはごく一部である。文物のデジタル化を行うことで、様々な制約に制限されることなく、普段、一般には公開されることのない文物についても、閲覧システムを通して展示することが容易となる。そこで、故宮博物院の収蔵品の中から、時代、サイズ、素材特性等の観点から調査・分類し、本システムで使用する対象の選定を行った。対象とした4点の文物について、以下に説明する。

(1) 太平有象瓶

制作年代も制作者も不明である。紫禁城養心殿東暖閣、皇帝の宝座のそばに置かれ、

瓶を背負った象の瑠璃製の置物で「平和」を意味する。像高は、約 56.9cm。

(2) 銅鍍金牛馱瓶花表

イギリスからの舶来品で、1600 年に明王朝の万歴皇帝へ献上された装飾カラクリ時計。紫禁城養心殿東暖閣の宝座の横に設置されている。像高は、約 56.9cm。

(3) 漢代上蔡侯作硯滴

漢代上蔡侯作の青銅器。内部は空洞になっており、水を入れ、筆を洗うために用いられたと考えられている。像高は、約 7.3cm。

(4) 漢代の青銅製子牛

漢代の青銅器。作者・使用目的とも不詳。優雅な姿勢が特徴で、腹部に穴が開いており、中空になっている。像高は、約 5.1cm。

上記 4 種の対象物は、大きさの違いから、2 種類に分類された。1つは、ディスプレイの画面内に収まらない大きなものであり、(1) 太平有象瓶と(2) 銅鍍金牛馱瓶花表が分類される。もう1つは、画面内に収まる大きさのものであり、(3) 漢代上蔡侯作硯滴、(4) 漢代の青銅製子牛が分類される。本システムでは、対象物の大きさを考慮したインタラクションや立体視の表現を試みた。

3. 2. 2 3次元CGモデルの生成

本ビューワースステムのコンテンツとして実装するために、選定された文物のうち(3) 漢代上蔡侯作硯滴、(4) 漢代の青銅製子牛の 2 点を北京大学情報科学センター査紅彬研究室において、レーザースキャナーによる 3 次元計測と CG ソフトウェアによるマニュアルモデリングの 2 通りの手法を用いて 3 次元 CG モデル生成を行った。その上で、3 次元計測によるデータとマニュアルモデリングによるデータについて、各種情報の分析と比較をすることで、3 次元モデルの構築に関する基礎的検討を行った。

(1) 形状データの生成

3 次元計測には、コニカミノルタ社の非接触 3 次元デジタイザ Vivid 910²⁾を使用した。テクスチャ情報は、3次元計測時に Vivid 910 内のカメラで同時に取得され、自動的にマ

ッピングがされる。マニュアルモデリングには、オートデスク社の 3 次元 CG ソフトウェア Autodesk 3ds max³⁾を使用した。デジタルカメラで撮影された高精細画像から、テクスチャを作成した。3 次元計測によって得られた 3 次元モデルデータとマニュアルモデリングによって得られた 3 次元モデルデータの総ポリゴン数を以下の表に記す。

表3.1 3次元モデルデータのポリゴン数

	3次元計測	マニュアルモデリング
上蔡侯作硯滴	168,854 ポリゴン	2,719 ポリゴン
子工万爵	450,135 ポリゴン	3,340 ポリゴン

表からマニュアルモデリングで得られた 3 次元モデルのポリゴン数は、Vivid 910 での 3 次元計測で得られた 3 次元モデルの 60 分の 1 から 300 分の 1 になっていることがわかる。3 次元計測で得られる 3 次元モデルでは、形状は点群で構成されており、ポリゴン数は通常多い。それに比べ、マニュアルモデリングで作成した 3 次元モデルのポリゴン数は非常に少ない。これは、制作者が対象の外形を把握し、部分ごとの複雑さを判断して、モデル各部に応じたポリゴン数を確定できるからである。しかし、Vivid 910 での 3 次元計測は、点群の座標は対象の外形に基づいて正確に情報を記録される。そのため、モデルの精度は非常に高いと言える。対して、マニュアルモデリングによる 3 次元モデルの精度は、制作者の経験・制作能力に委ねられている。

ただし、3 次元計測で得られるモデルデータは、ポリゴン数からもわかるように容量が大きく、処理するには高性能な PC を必要とする。マニュアルモデリングによるモデルデータは小さく、PC に掛ける負荷も小さい。

(2) テクスチャ情報の生成

Vivid910 での 3 次元計測時に取得できるテクスチャ精度は、640×480pixel である。対して、マニュアルモデリングの際に用いたテクスチャは、全てデジタルカメラ撮影されたもので、精度は 3072×2048 ピクセルである。図 3.1、図 3.2 に示す通り、Vivid910 での 3 次元計測時に得られるテクスチャでは、ディテールが失われ質感が表現されていないのに対して、マニュアルモデリングに用いたテクスチャは、文物のディテールがよく表現され質感を保っている。



元画像



部分を拡大

図3.1 次元計測時に取得できるテクスチャ



元画像



部分を拡大

図3.2 マニュアルモデリングに用いたテクスチャ

(3) ビューシステム用 3 次元 CG モデルの検討

モデル精度を比較した結果、3次元計測で得たモデルの精度はマニュアルモデリングで得たモデルより遥かに高品位であった。ディテールにおいても、3次元計測は正確に対象の表面形状の変化を表現できていたが、マニュアルモデリングでは対象の全体形状しか表現できず、些細な形状の変化を再現することは難しい。一方で、データのサイズで言えば、3次元計測によるモデルはPCへの負荷が高く、今後ビューシステムへ実装に問題があることが予想された。

テクスチャ精度とテクスチャマッピングにおいては、3次元計測に短所があり、Vivid910で獲得したテクスチャの精度は、マニュアルモデリングのテクスチャ精度に大きく劣っていた。マニュアルモデリングにおいては、高精細なテクスチャによりモ

デル精度が低いという欠陥を補い、高い視覚効果を得ているといえる。

以上のことから、文化遺産の保存用高精細モデルの制作においては、レーザースキャナーなどの3次元計測で3次元モデルを獲得し、高解像度のデジタルカメラで対象の各面の写真を撮影し、マニュアル操作により3次元モデルに高精度なテクスチャを制作するプロセスが、目下の技術条件で最も現実的かつ効果的なモデリング方式だと示唆された。

しかしながら、本章で取り上げるビューシステムでは、3次元CGモデルを高解像度で右眼用画像と左眼用画像の2枚をリアルタイムにレンダリングする必要がある。ポリゴン数が多く、データサイズの大きい3次元データは使用できないため、マニュアルモデリングされた3次元データを使用した。制作された文物4点の3次元CGモデルを図3.3に示す。



(1) 太平有象瓶



(2) 銅鍍金牛馱瓶花表



(3) 漢代上蔡侯作硯滴



(4) 漢代の青銅製子牛

図3.3 使用したコンテンツの3次元CGモデル

3. 2. 3 視線の設計

博物館や美術館での展示では、鑑賞者が展示品を「みる」「くらべる」「しる」といったことが機能するように、展示品の内容、配置、動線が設計されている。「みる」ことを目的とした場合には、展示品の高さを決定し、鑑賞者の視線を設計することが重要とされている。文化遺産のなかでも、故宫博物院に収蔵される文物に代表される机上サイズの対象は、腰高ほどの展示ケースに陳列され、少し見下ろす位置に展示されることが多い(図 3.4)。少し見下ろす視線というのは、実際に文物が愛でられていた視線であり、展示対象の全体像を把握できる視線である。また、VDT 作業などによる眼精疲労に関する研究で明らかのように、近傍の対象をみる際の人間工学上の負担が少ないとされる下方視になるように設計されている⁴⁾。対象としている机上サイズの文化遺産を展示する際には、少し見下ろす位置に配置することで、観察者は快適に、全体像を把握しながら、親しみやすい視線位置で文化遺産を鑑賞することができる。



図3.4 展示施設での一般的な鑑賞姿勢

3. 2. 4 3D 映像の水平面呈示

本システムでは、博物館での環境に近い少し見下ろす視線位置での鑑賞を再現するために、水平面に 3D 映像を呈示することで再現している。これは、地面と水平な面にパ

パースペクティブ補正した映像を呈示するもので、CAVE⁵⁾や CABIN⁶⁾などのプロジェクタ投影による没入型3D映像システムでは、よく用いられる方法である。通常の3D映像では、対象の前後関係を呈示でき、鑑賞者にとって「奥行き感」が重要な要素となる。しかしながら、対象によって最適な呈示方法は異なると考えている。前述のような小型の対象、特に上からのぞき込むように鑑賞する対象については、対象の「高さ」が重要な要素となるのではないかと考えられる。こうした対象の呈示では、「高さ」が表現可能な水平呈示型の3D映像が有効であると考えられる。水平呈示型の3D映像は、医療用学習コンテンツでの事例が報告されている。⁷⁾本システムでは、CGモデルをレンダリングする際のカメラのビューフラスタム(View Frustum)に対してアフィン変換を行い、撮像面が水平面と平行になるように変形させることで、パースペクティブの補正された左右画像をレンダリングしている(図3.5)。

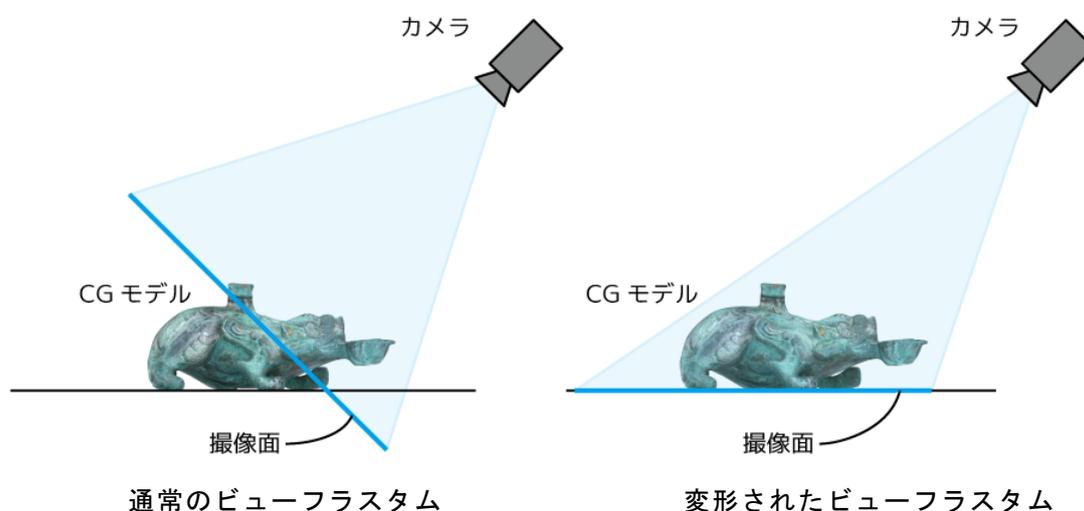


図3.5 水平呈示型のビューフラスタム

通常、水平表示型3D映像では、視点の移動による再生像の歪曲が大きくなる。しかし、本システムではディスプレイと接眼位置を固定しているため、複数人での鑑賞が不可能である代わりに立体像の歪みが抑制されるという特徴がある。加えて、忠実な立体像を再現するという観点から、対象は実寸大で表示されるようにした。また、立体映像の水平表示には、通常よりも広いディスプレイ面積が必要である。そのため水平表示の立体映像では、特に、大型の対象で工夫が必要となる。本研究では、上述のディスプレイの画面サイズよりも大きなものとして分類された対象が該当する。

テレビ鑑賞や映画館で鑑賞する際の一般的な垂直平面上への 3D 映像呈示ではなく、水平面への 3D 映像呈示を用いることで、垂直方向に立体像を再生できるため、「高さ」を視覚的に表現することが可能となる。「高さ」を表現できることで、上からのぞき込んだ姿勢での、手元での作業に適している 3D 映像呈示方法であるといえる(図 3.6)。こうした、水平表示型の 3D 映像を利用して「高さ」を表現として取り入れている例として、近年では Phantogram⁸⁾がよく知られているが、赤青メガネをかけて観察するアナグリフ方式で表現されることが多く、フルカラーのものは少なく、さらにインタラクティブなコンテンツでの利用例は少ない。

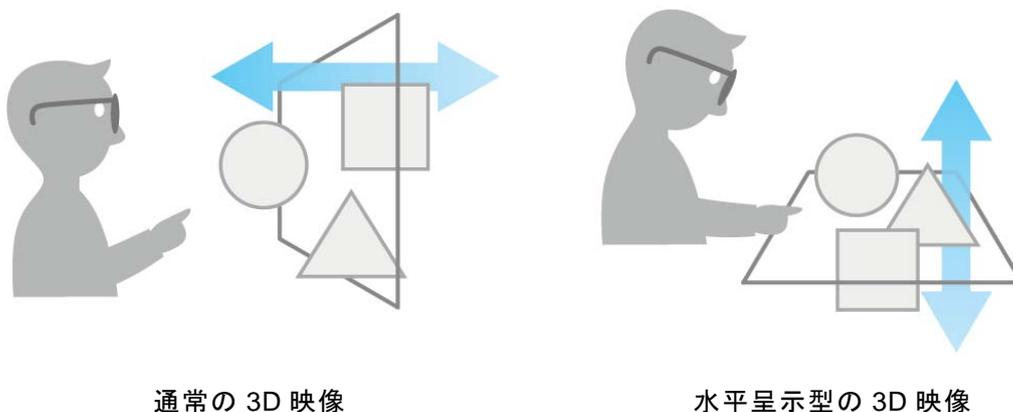


図3.6 3D 映像の呈示方向による映像表現の違い

3. 2. 5 ハンズ・オン展示とクロスモーダル刺激

博物館で展示されている作品や文化遺産に実際に触れてみたいと感じたことは、観覧者であれば多い。しかし、展示物に触れることが許されているケースは、ほとんどないといっている。作品や文化遺産などの収蔵物を管理・保存するという観点からは、当然のことと言える。一方で、子供を対象とした博物館などで触れることで学べる展示として、ハンズ・オン(Hands-on)と呼ばれる展示方法がある⁹⁾。アメリカを中心とする海外諸国では、ボストン子ども博物館¹⁰⁾に代表されるチルドレンミュージアムが多数存在し、「そのものについて実際に体験することで、そのものについて理解を深める」といった趣旨に基づき、ハンズ・オン展示が行われている。国内でも、文科省によって 1999 年施行された「全国子どもプラン」¹¹⁾のなかで、「ハンズ,オン(自ら見て・触って・試して・考える)」活動を推進している。国内においては、ハンズ・オン展示を実施している博物館は多くなく、根付いた展示方法

とはいえない。これには、収蔵品の管理・保存、展示スペース、安全性の確保や予算などの課題の他に、「触れる」ことが効果的な学習につながる対象選定や展示演出のむずかしさがあると推察される。しかしながら、展示品をガラス越しではない、ハンズ・オンによる鑑賞は、実際の触り心地や重みを感じることで、素材感、形状の把握、用途の予測、そしてなによりも対象に対する興味や醸成において、つよい効果を得られるものである。本研究で観覧者へ呈示するものは、3D 映像であり、管理や保存といった観点からの問題はない。閲覧システムには、「触れる」といった感覚を負荷することで、展示における体験型学習を可能にしようとする試みを含んでいる。

実体を使用せずに、「触れる」という感覚を表現するためには、クロスモーダル刺激を利用する。クロスモーダルとは、複数の知覚モダリティが統合されることにより相互に作用し、人がもごとの知覚を行っていることをさす¹²⁾。クロスモーダル刺激とは、視覚や触覚、聴覚などの複数の感覚を統合することによって、単一の感覚刺激では表現が困難であった感覚や体験を呈示できるものとして、VR コンテンツ分野で利用されている¹²⁾。本システムでは、文物に「触れる」という感覚を 3D 映像によって体験させるために、このクロスモーダル刺激を用いることにした。

3. 2. 6 ハードウェアの構成

本システムの構成を図 3.7 に示す。本システムは、3D ディスプレイを組み込んだビューア部分と文物の 3D 映像をリアルタイムレンダリングするための制御用コンピューターからなる。ビューア部は、偏光フィルターを利用して左右像を分離する μ Pol 方式の 17 インチ 3D ディスプレイ（有沢製作所）を水平に設置し、観察者が体を 30 度前傾させ、画面をのぞき込む形に設計した。ディスプレイの解像度は、SXGA（1280×1024pixel）である。接眼位置には、上述の 3D ディスプレイに対応した偏光フィルターをはめ込み、遮光用のゴム製フードで覆った。出力される文化遺産の 3D 映像コンテンツが、ディスプレイ面の反射などなく鮮明に表示されるように、観察者の体で遮蔽される前面以外をアルミの板によって覆い、ディスプレイ部分への光の入射を極力防止できるように筐体の設計を行った。また、ディスプレイを見ながらコンテンツをインタラクティブに操作するために、2 系統のセンサーを用意した。一つは、ディスプレイ枠に赤外線イメージセンサー方式タッチセンサ（イーアイティー社）であり、ディスプレイ面上での指の動きを検知できるようにした。ディスプレイ面上には、タッチセンサーの高さにガラスをはめ込み、検

知される指先の位置がディスプレイ面と一定の距離を保てるようにした。もう一つは、観察者がハンドルを使ってディスプレイ面を上下に 5 度ずつ傾けられるような駆動系と操作用ハンドルを設けており、その傾斜角を検知するためのティルトエンコーダーである。これらにより、観察者はタッチセンサーで画面に提示される GUI (Graphical User Interface) を操作し、ディスプレイを傾斜させることで対象コンテンツを操作できるようにした。

リアルタイムレンダリングを行うための制御用コンピューターは、ビューワ部のセンサーからの入力を受けて、ビューワ部へレンダリングされた 3D 映像の出力を行う。タッチパネルからの入力情報は USB 端子、ティルトエンコーダーからの入力情報は COM 端子を利用した。映像の出力は、右眼用の映像と左眼用の映像を、 μ Pol 方式の 3D ディスプレイに対応した形式でリアルタイムにレンダリングする。3D 映像のレンダリングには、ティルトエンコーダーからの入力されるディスプレイ面の傾きを考慮して、立体感に歪みが発生しないように常に補正された描画が行えるようにプログラムを実装した。

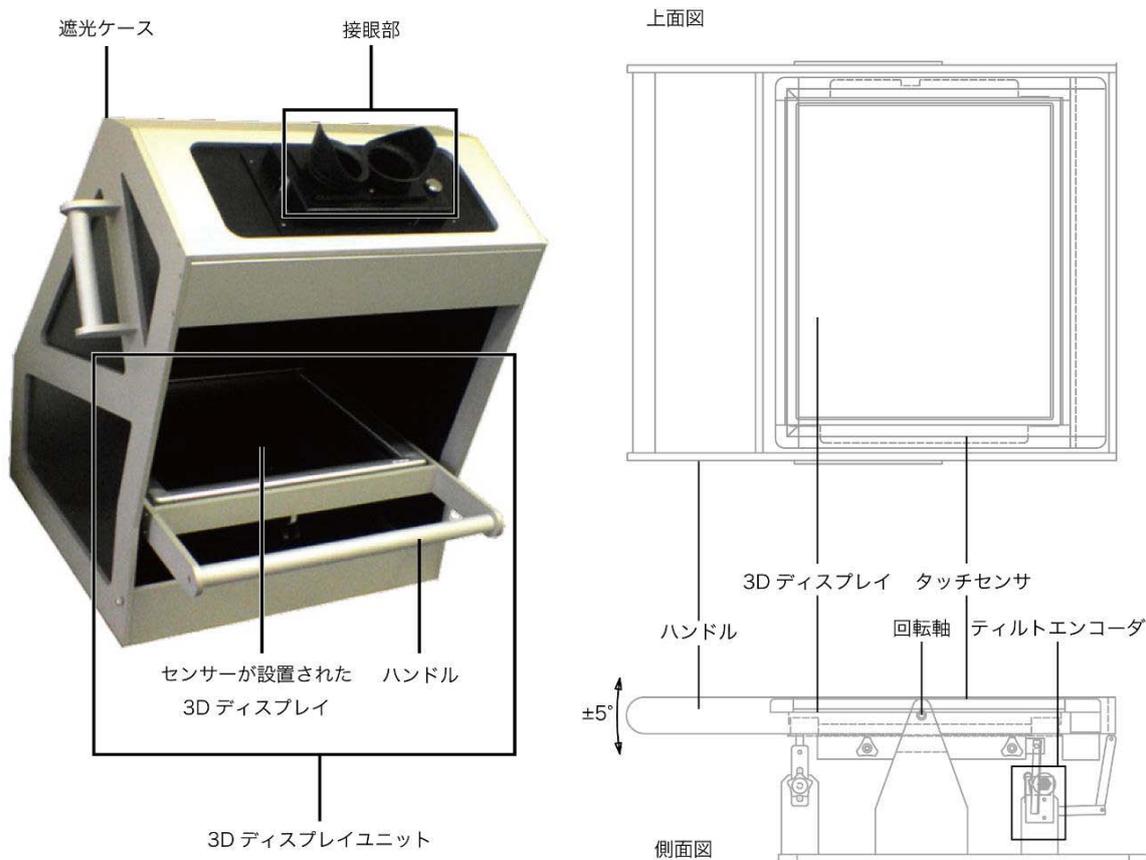


図3.7 システムの構成

3. 2. 7 インタラクションの構成

上述の3次元計測された故宮文物の3次元CGモデルを、インタラクティブに立体表現するための操作方法として、ハンドルによる画像呈示面の傾斜とボタン型のGUIを採用した。ボタンには、表示モードの切り替えや回転、説明表示、リセットなどの機能を用意した。これらのボタンは、触れることで「沈む」という視覚的フィードバックを3D映像で表現し、操作者の理解を助けるインタラクションを付加している。ボタンの位置は、ディスプレイ面上のガラス面の位置に表示されるよう視差を調節した。また、押され選択されているボタンは、グレーにしておくことで、どの機能が有効であるか一目で分かるようにした。

(1) ティルト機能

ディスプレイと接続されたハンドルを操作してディスプレイ面を傾斜させると、その傾斜した方向に対象が回転する。ハンドル操作による回転量は、ディスプレイの上下5度ずつの傾きに対して、対象は上下方向90度ずつを割り当てた。つまり、ハンドルを1度上方へ傾ける操作を行うと、対象の3D映像は奥側に9度傾くことになる。これにより、あらゆる方向から対象を観察することを可能とした(図3.8)。また、ディスプレイの傾斜時にも歪みのない立体映像を再生するために、ティルトエンコーダーより得られる傾斜角データからパースペクティブの補正量を再計算し、リアルタイムにレンダリング結果に反映させている。本機能は、後述する視触覚刺激による演出機能以外の機能と併用できるように設計した。

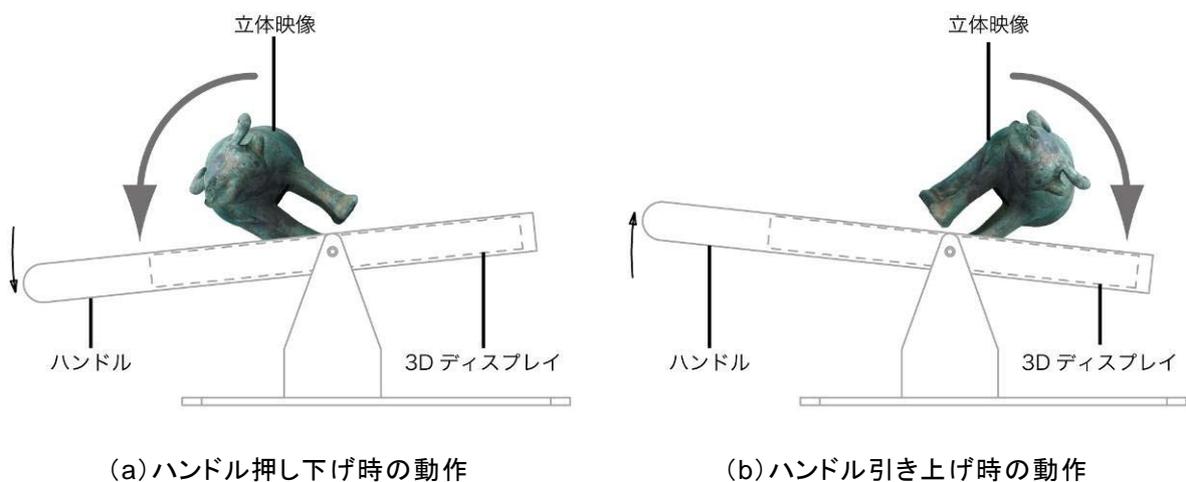


図3.8 ティルト機能

(2) ローテーション機能

Y 軸を中心として、オブジェクトを回転させる。本機能も視触覚刺激による演出機能以外の機能と併用できるように設計した。ティルト機能と併せて使用することで、対象を 360 度方向から観察することができる。

(3) テキスト表示機能

対象とした 4 点の文物について解説するテキストをそれぞれ表示する。テキストを表示する際には、テキストに重ならぬよう、オブジェクトを縮小して奥行き方向にスムーズに移動する処理を採用した。テキストは浮き方向に表示し、ディスプレイ面が水平を保つときに視線と垂直になるように配置した。テキストの背景になるオブジェクトは、輝度を落とし解説文の可読性を妨げないように配慮している(図 3.9)。2D 映像による表現では、オブジェクトを完全に背景として表示させるか、テキストとは別窓で表示するが、3D 映像ではこのようにオブジェクトとテキストを前後に表示させることができる。オブジェクトの立体感を確認しながら、同時に解説文を読むことができるように表示させるのは、3D 映像表現ならではのいえる。

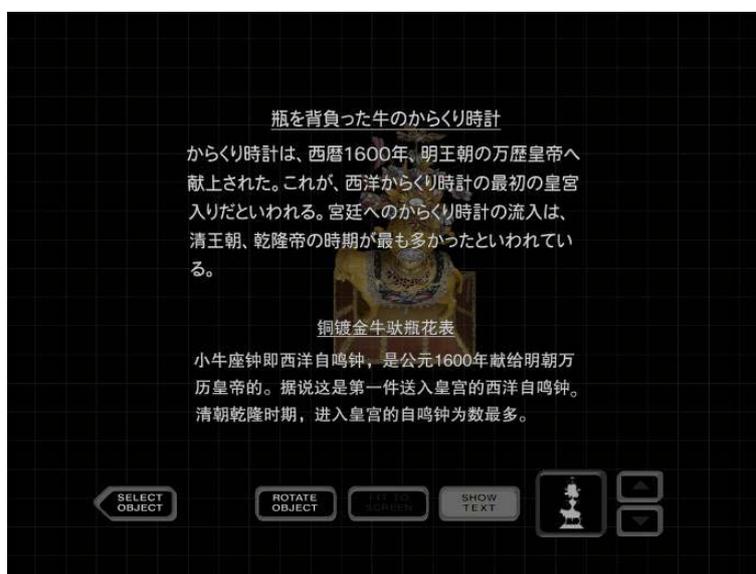


図3.9 テキスト表示機能

(4) 分割表示

呈示するディスプレイの画面サイズよりも大きい対象を実寸大で表示するモード(図

3.10)。この表示モードでは、通常に表示すると画面からはみ出す部分や、視差が過大となり3D映像として融像が困難になってしまう部分について、3つのパーツに分割して表示することで、鑑賞者の立体視を補助している。また、分割されて表示されない部分については、半透明にレンダリングすることで、表示されている部分が文化遺産の一部であることを暗喩させ、物体としての連続性を保持させている。

分割されたパーツの選択は、右下に配置された三角印ボタンで操作する。初期状態は3分割された中の中央部分が表示されており、三角印ボタンすぐ左側に対象をアイコンにした画像の一部をハイライトして、表示されているパーツがどの部分であるか示すように設計した。



(a) 分割表示用インターフェース



(b) 分割された中央部分

図3.10 分割表示

(5) 全体表示

ディスプレイの画面サイズよりも大きい対象を、再生するディスプレイのサイズに適した大きさにスケールして表示を行うモード(図 3.11)。このモードでは文化財の全体を見ることができ、また立体映像として、観察者が融像できる範囲の3D映像となるように呈示を試みている。

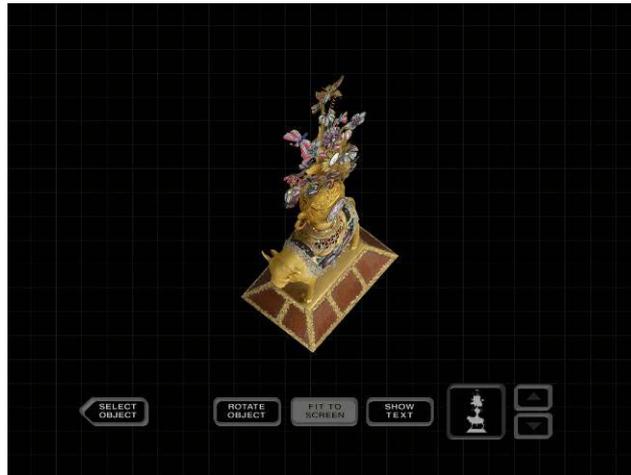


図3.11 全体表示（Fit to screen 機能）

(6) 視触覚刺激による演出

これは、クロスモーダル刺激を利用した、一種の錯覚を意図した実験的な機能である。具体的には、タッチセンサーのガラス面に触れた際に、対象の立体映像の再生位置を制御することで、指先をガラス面上で動かしても、視覚的には対象の表面が指先に接している状態が維持されるようにした。タッチセンサーで感知した指先の位置と対象の3次元CGモデルの衝突判定を行い、対象オブジェクトを上下移動させレンダリングすることで、再生位置を調節している。ガラス面を指が設置している得られる触覚刺激と3D映像の表面が指先に呈示されている視覚刺激とが統合的に知覚されることで、対象の表面を撫でていような感覚の演出されるよう試みた。

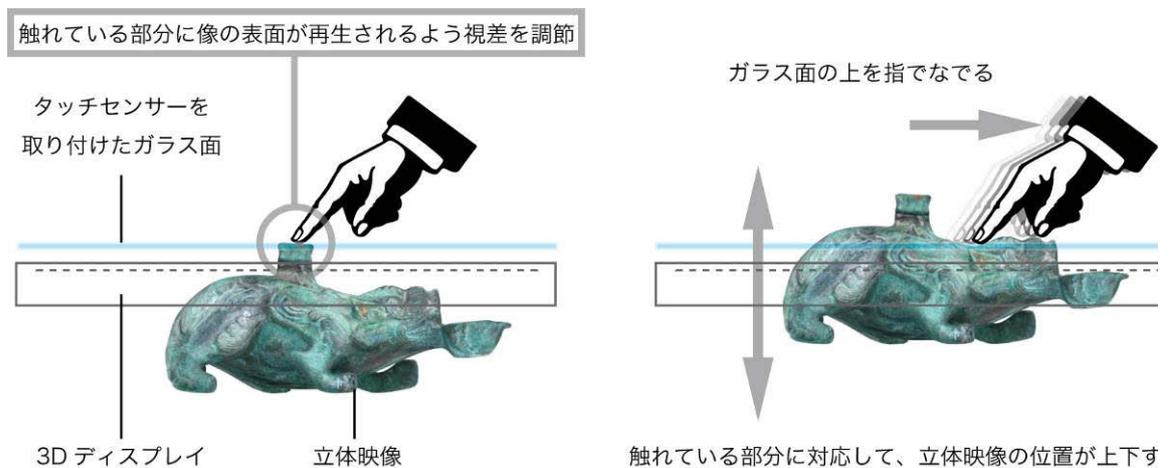


図3.12 視触覚刺激による演出

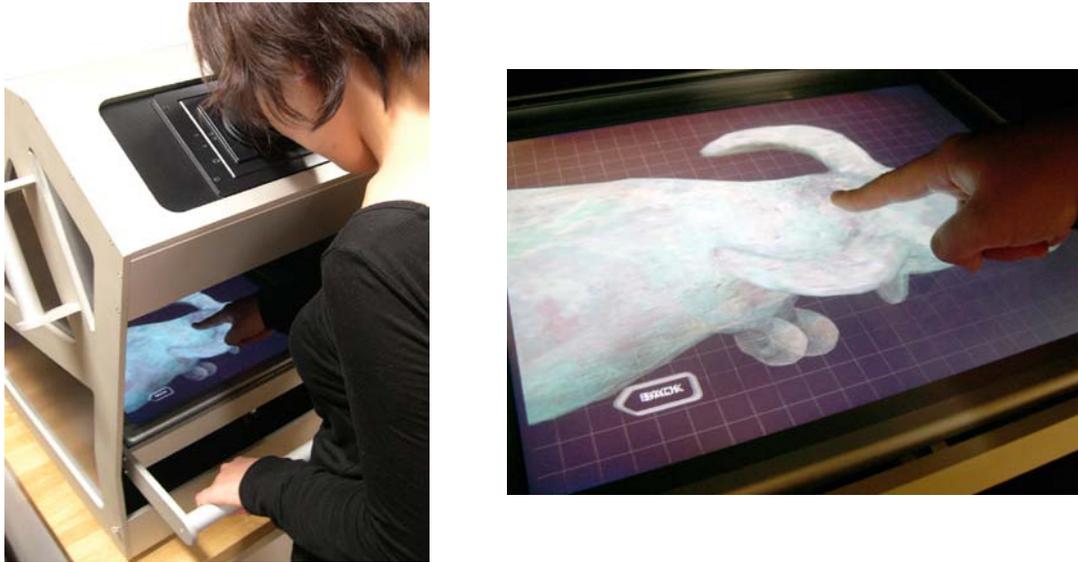


図3.13 視触覚刺激による演出の操作風景

ディスプレイの画面サイズよりも大きな対象には、(1) (2) (3) (4) (5)のインタラクション機能を、小さな対象には、(1) (2) (3) (6)のインタラクション機能をそれぞれ付加した。

3. 3 システムの評価

3. 3. 1 評価方法

本システムの評価としてユーザーテストを行うために、被験者 6 名に観察・操作を求めた(図 3.14)。ビューワーシステムに呈示する 3D 映像のレンダリングには、CPU: Pentium4 3.2GHz、メモリ: 1GB RAM、グラフィックスボード: NVIDIA GeForce7600GT 256MB の制御用 PC を用いた。被験者は、ディスプレイの画面サイズよりも大きな対象と小さな対象を、それぞれ 1 つずつ選択し、GUI で実装されたすべてのボタン操作とハンドル操作、視触覚刺激による演出機能での操作を行った。観察・操作中、被験者にはインタフェースやコンテンツについて思い浮かんだことを発話してもらい、その発話データと操作内容を撮影・記録した。また、観察・操作後には、発話内容や操作についてのインタビューを行った。

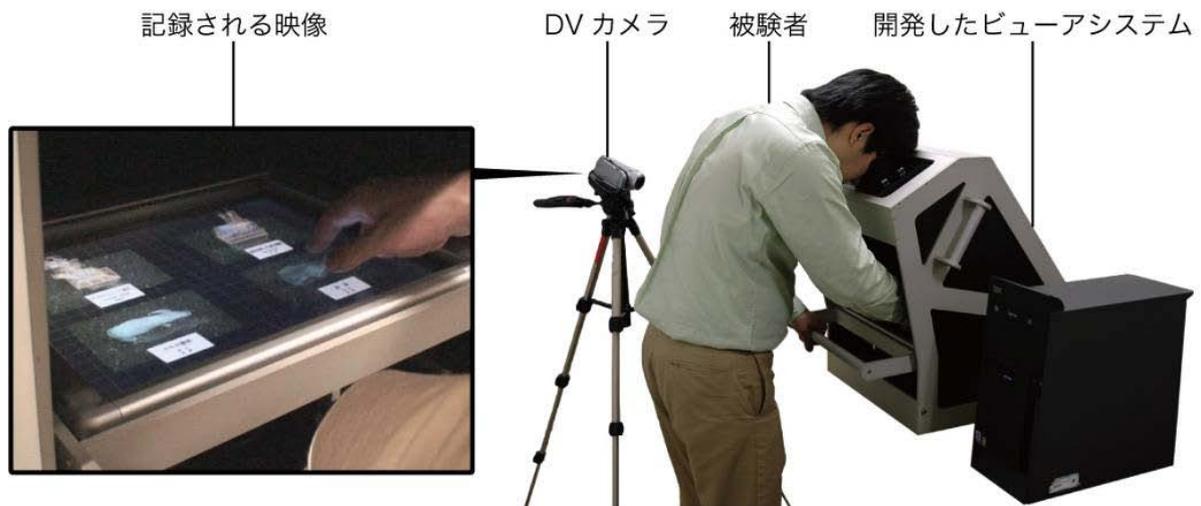


図3.14 ユーザテスト環境

3. 3. 2 結果と考察

被験者の発話や操作内容、実験後のインタビューから以下のような結果が得られた。

3D 映像の見え方

立体感については、多くの被験者から良好であり、対象の形状・大きさを理解するために効果的であるという意見が聞かれた。大きさの理解を助けるものとして、実寸大の 3D 映像であること、タッチパネルで操作するために被験者本人の手と比較できることがあげられた。ただし、タッチパネルを操作する際には、再生されている 3D 映像と指が交差すると、奥行き情報に矛盾が生じて違和感があるという意見も複数聞かれた。また、「太平有象瓶」や「銅鍍金牛駄瓶花表」においては、高さがあるために視差量が大きくなり、融像できないという意見も聞かれた。3D 映像の融像限界には個人差があるため、多くのユーザーが利用することを考慮すると、高さのある大きな対象の実物大表示を行う際には、より細かく分割して表示するか、またはシームレスに表示されるエリアを調節することで、最大の視差量を抑制する必要があることが示唆された。文化遺産のアーカイブデータとして重要な要素である画質については、大変良好であった。

インタラクションと表示モード

ハンドルによる対象の回転操作は、被験者のほとんどから直感的で分かりやすいという

報告が得られた。「思ったところを見られる」、「思い通りに動いて気持ちがいい」など操作感についても好印象な意見が多く報告された。ユーザーにとって、ディスプレイに表示された対象を回転させるという動作と、バンドルを傾斜させるという動作とが、容易かつ直接的に結びつく関係であったこととともに、3D 映像がレンダリングされる速度、ティルトエンコーダーによる角度の入力精度が良好であったことに起因していると思われる。しかし、バンドルを最大に押し下げた時に、構造的にディスプレイが傾くために、わずかに立体視できなくなる部分があるなど、立体視ディスプレイの分離方式上の問題点や、タッチセンサーを用いた指先のジェスチャーのみの入力での回転操作をしたいという意見も聞かれた。

視触覚刺激を利用した「触れる」感覚の演出については、観察者の興味をそそるような面白さがあるといったことやオブジェクトの形状理解に役立つなどのポジティブな意見が聞かれた。一方で、機能の内容のわかりにくさ、他のモードと比較して付加が高いことからくるセンシングや描画の処理の遅延なども指摘され、触れる感覚の強度の不足が指摘された。ディスプレイの画面サイズよりも大きな対象での半透明処理については、評価が分かれた。

システムのユーザビリティ

操作のわかりやすさとして、ボタンがシンプルであることや大きさなどが評価される一方で、ボタンを押したときのフィードバックには、沈み込みのアニメーションのみでなく、オーディオでのフィードバックが欲しいといった意見も聞かれた。本システムで使用したタッチパネルは抵抗膜方式や静電容量方式ではなく、赤外線イメージセンサー方式でユーザーの指の位置を入力しているため、ボタンが押される高さと言語がガラス面に触れる高さが異なり、違和感を覚えるときがあると言った意見もあった。また、今回のユーザーテストは、システムの設置高を固定していたため、ユーザーによっては、長時間鑑賞時には姿勢を維持するのに負担がかかり疲労を生じるとの意見が聞かれた。博物館などにシステムを設置し運用するには、様々な年齢層のユーザーを想定し、システムの設置高を容易に調節できるようにすることが望ましいことが示唆された。

3. 4 まとめ

本章では、文化遺産の新たな 3D 映像表現という切り口から、インタラクティブ性を有した水平表示型 3D ディスプレイシステムを試作した。表示する対象について、3次元計測と

マニュアルモデリングによる CG モデルの生成を行い、それぞれ得られた 3 次元デジタルデータの比較検討をした。その結果、文化遺産の保存用高精細モデルの制作においては、3 次元計測で 3 次元モデルを獲得し、高解像度のデジタルカメラで対象の各面の写真を撮影し、マニュアル操作により 3 次元モデルに高精度なテクスチャを制作するプロセスが、目下の技術条件で最も現実的かつ効果的なモデリング方式だと示唆された。しかしながら、本章で取り上げたビューシステムでは、リアルタイムレンダリングを行うため、ポリゴン数が多く、データサイズの大きい 3 次元データは使用できず、ポリゴン数の少ないマニュアルモデリングで生成された 3 次元モデルを使用する必要があった。

本システムでは、立体映像の水平表示を行うことで高さを表現すると同時に、多様なインタラクションを実装した。ユーザーテストの結果から、立体感や質感について良好な評価が得られ、本システムでの立体表現が、形状や大きさといった、文化遺産にとって重要な情報の理解に効果的であることが示唆された。画像呈示面を傾斜させるという操作については、直感的で分かりやすいと評価されたことから、立体映像を操作するための、一般的なインターフェースとしての可能性がある。指先のセンシングと対象の融像位置の調整によるクロスモーダル刺激によって、物体表面を撫でるというインタラクションにおいても、形状の把握に有効であるとされた。しかしながら、意図したような「触れる」感覚という点では、感覚の強度が不足していることがわかり、3D 映像を用いたクロスモーダル刺激による視触覚の統合やインタラクションに、多くの課題や改善点があると考えられた。その他、立体像と指の交差による奥行き情報の矛盾や、画像呈示面の傾斜による左右像の分離の低下といった、立体映像を用いたインタラクティブなシステムにおける特徴的な問題点も指摘された。

3. 5 参考文献

- 1) 中華人民共和国 故宮博物院 : <http://www.dpm.org.cn>
- 2) コニカミノルタセンシング株式会社/ 3 次元デジタイザ Vivid910 :
<http://www.konicaminolta.jp/instruments/products/3d/index.html>
- 3) オートデスク株式会社 Autodesk 3ds Max :
<http://www.autodesk.co.jp/3dsmax>
- 4) Grandjean, E.: Fitting the task to the man, Taylor & Francis, London (1988); 中迫, 石橋訳 : 産業人間工学, 啓学出版, (1992).

- 5) C. Cruz-Neira, D. J. Sandin and T. A. DeFanti, “Surrounded-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE”, ACM SIGGRAPH 93, pp. 135-142, (1993).
- 6) 廣瀬通孝, 小木哲朗, 石綿昌平, 山田俊郎 : 多面型全天周ディスプレイ (CABIN)の開発とその評価, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No.5, pp.888-896, (1998)
- 7) 河合隆史, 野呂彰勇 : 外科手技教育と立体映像システム, 医科器械学, Vol.69, No.3, pp.130-134, (1999) .
- 8) Terry Wilson, “A Phantogram Retrospective”, Stereo views, Vol.11, No.9, pp.1-8, (2004).
- 9) ティム・コールトン (著) , 染川香澄, 芦谷美奈子, 井島真知, 竹内有理, 徳永喜昭 (訳) : ハンズ・オンとこれからの博物館, 東海大学出版, (2000).
- 10) Boston Children’s Museum : <http://www.bostonkids.org/>
- 11) 文部科学省 : <http://www.mext.go.jp>
- 12) 大山正, 今井省吾, 和氣典二 編 : 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック Part2, 誠信書房, (2007).
- 13) 盛川浩志, 河合隆史, 宗形昌幸, 田邊亨, 斎藤史彦, 野中睦: “安全教育 VR コンテンツにおけるクロスモーダル刺激の呈示方法に関する検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.4, pp.479-485 (2006).

第4章 大規模遺跡における文化遺産アーカイブの3D映像表現の検討

4.1 本章の目的

第3章では、中国故宮博物院の文物をインタラクティブに鑑賞するためのビューワーシステムの試作を行った。ユーザテストの結果から、3D映像表現や映像に触れるインタラクションが、文物の形状や大きさといった情報の理解に効果的であることが示唆された。しかしながら、文化遺産には様々な形態のものが存在し、その大きさや規模に応じて、観察方法も異なる。3D映像の呈示において、対象物の大きさや形状を正確に表現するためには、両眼に対応したカメラの設定、および呈示環境が重要であり、それらを考慮したVRコンテンツ呈示システムが必要である。第2章で述べた通り、両眼視差による立体知覚は10m以内で特に有効で、建築物や大きな遺跡などに対しては、自然視では空気遠近や隠蔽、相対的なサイズなどの立体情報を利用して、その形状を知覚している。そのため、立体形状を把握するのにもっとも有効である両眼視差は、建築物や大きな遺跡などの大型文化遺産では、利用できていないことになる。

そこで本章では、大規模な文化遺産の鑑賞に適した3D映像の呈示システムの構築を目的として、VRコンテンツ上で3D映像を生成するためのカメラ設定を、観察する対象に応じて調整することが可能なVRシステムの開発を行った。VR環境であれば、カメラ設定を対象の大きさに応じて自由に設定できるので、両眼視差を利用した3D映像の呈示が可能となる。具体的には、鑑賞する文化遺産として、大規模な仏教遺跡である中国麦積山石窟を対象とし、3次元デジタルアーカイブを行った。3次元形状の取得において、崖一面に穿たれた石窟全体、一つの石窟内、石窟内に安置された塑像という、大きさの異なる対象について3次元モデルの生成を行った。それぞれの対象が、最適な立体感で呈示されるよう、カメラ設定の調整を行った。また、VRコンテンツでは、石窟内で自由に文化遺産に近づいたり遠のいたりできるインタラクティブなパートをもうけ、実際に現地を訪れ多様に文化遺産を体験できるよう演出した。対象への距離に応じてカメラ設定を自動的に補正して、正確な立体感が常に得られるようにカメラ設定の検討を行った。文化遺産コンテンツを少人数でじっくりと鑑賞する環境として、一般的な40インチから120インチ型程度のホームシアターを想定した。ホームシアターサイズのシステムであれば、小型のディスプレイでの呈示のように対象について迫力を失わずに、シアターのような大型スクリーンほどは視差量の限界を考慮せずに、文化遺産を

3D 映像で表現できると思われる。システムの評価として、制作した VR システムにより 3D 映像を生成し、コンテンツの立体感の評価を行った。

4.2 中国麦積山石窟

中国北西部の甘肅省天水県から東南に 45 キロ離れた森林地帯に位置する麦積山石窟は、全高 70 メートル程ある絶壁に刻されており、中国国内でも有数の大規模な石窟である(図 4.1)。その保存状態は非常によく、北魏、西魏、北周、隋、唐、五代、宋元、明、清などの各時代の石窟が 194 個、塑像や石彫像が 7200 体あまり、壁画が 1300 平方メートル現存しており、中国の仏教史、歴史学、考古学、民俗学の研究に重要な遺跡である¹⁾。また、その歴史的価値や高い芸術性から、雲崗・龍門・敦煌と並び称され中国四大石窟の一つに数えられる貴重な文化遺産である。



図4.1 麦積山石窟(第 123 窟と逆方向から撮影)

本研究で制作する VR コンテンツの中心となる第 123 号窟は、西崖上部の一般非公開エリアに位置している。西魏(535—556 年)に建窟された約 2.5 メートル四方の窟内には、9 体の塑像が納められ窟頂には飛天が描かれる。麦積山石窟にあって比較的小さな窟ではあるが、安置されている童女塑像は美術的に高く評価されており、とりわけ重要な窟の一つである²⁾。

麦積山石窟は、都市部からは遠く離れ、訪れにくい立地にあり、石窟数やその規模、芸術性に比較して日本で一般的な知名度はあまり高くない。また、石窟は脆弱な岩質で形成された絶壁に刻されており、貴重な石窟や壁画は安全といえる状況ではない。実際に、過去の地震によって一部が崩落・剥落している箇所も見受けられる。以上の条件からも、麦積山石窟を 3 次元デジタルアーカイブし、VR コンテンツ化して一般に公開する機会を設けることは、訴求性や重要性が高いと考えられる。

4.3 3次元計測とCGモデル制作

VR コンテンツ用の 3 次元 CG モデルには、3 次元計測器を使って得られたデータを編集して用いた。

4.3.1 3次元計測

VR コンテンツの制作に必要となる、麦積山石窟の外観と第 123 号窟の 3 次元計測を行った。コンテンツを制作する際に、対象によって必要となる 3 次元 CG モデルの精度と面積が異なるため、対象に応じて 2 種類の 3 次元計測器を使用した。CG モデルの必要面積が大きな石窟外観と第 123 号窟内の全景の計測には、位相差方式の Leica 社 HDS6000³⁾を用いた。逆に比較的必要面積は小さいが高精度が要求される石窟内にある 9 体の塑像の計測には、ステレオカメラとパターン光の投影ーションを利用した計測方式の天遠 OKIO⁴⁾を用いた(図 4.2)。あらゆる方向より漏れなく計測するためには、塑像一体当たり 30 数回の計測をする必要があった。

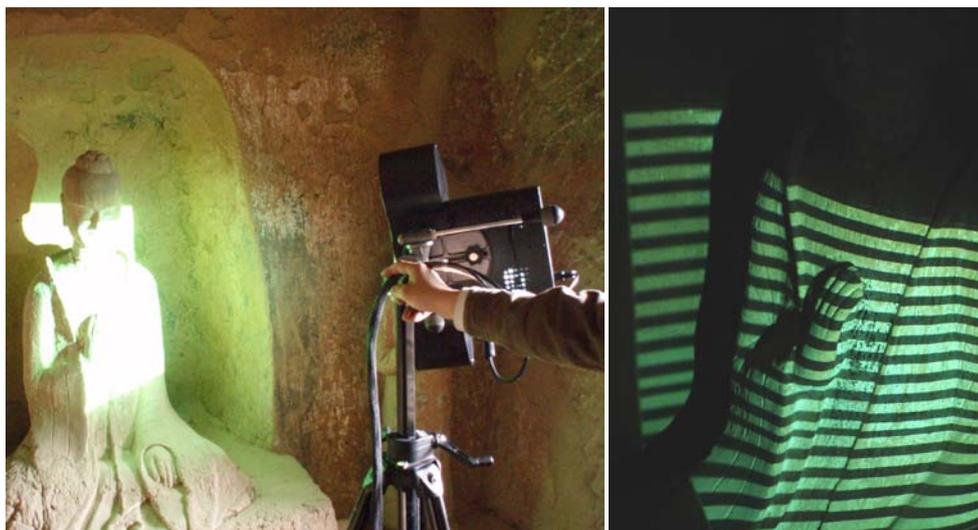


図4.2 天遠 OKIO での 3 次元計測

4.3.2 CGモデル制作

計測されたデータは、点群データとして取得されるため、CGモデルとしてポリゴンデータへ変換を行った。生成されたCGモデルは、塑像一体当たり数百万ポリゴンであった(図4.3)。第2章で使用した3次元CGモデル同様に、リアルタイムレンダリングを行うVRコンテンツでは、使用できるポリゴン数は限られる。そこで、VRコンテンツの再生時に安定したフレームレートを得るため、塑像一体当たり2万ポリゴンを上限として、リダクション処理を行った。

石窟外観の3次元モデルについては、3次元計測によって取得できなかったデータの欠損部分を手動モデリングで補った。外壁に沿うように設置されている欄干については、実物を参照し、3次元計測データで位置を確認してCGクリエイターが手作業でモデリングを行った。また、標高が高く多湿な現地の気候や環境を表現するために、霧モデルや森林を形成する樹木モデルを、欄干と同様に手作業でモデリングして配置した。霧モデルについては、自然界で霧が流れる様子をイメージし、画面右側から左側へと薄霧のCGモデルが、ループするアニメーションを設定した。

テクスチャについては、第2章で検証したように3次元計測時に取得できるものでは、VRコンテンツを高精細に表現するためには精度が不足する。そのため、別途、デジタルスチルカメラで撮影された高精細なテクスチャをマッピングした。

計測データの統合、点群データからのポリゴンデータへの変換、リダクション処理、およびテクスチャマッピングには、点群データ処理ソフトウェアのGeomagic⁵⁾とCG制作ソフトウェアのAutodesk 3ds max⁶⁾を使用した。



図4.3 生成された3次元モデル

4.4 VRコンテンツ制作

文化遺産を対象としたVRコンテンツの公開方法としては、博物館などでのイベント型の展示が想定され、多人数で鑑賞でき、かつ詳細まで観察できる自由度の高い視点操作が必要である。そこで、制作したVRコンテンツには、多人数での鑑賞を想定した動画部分と鑑賞者が操作し自由視点で観察するためのインタラクティブ部分を設けた。

4.4.1 VRコンテンツの構成

制作したVRコンテンツは、3部構成のシナリオからなる。第1部では、タイトル画面が明けると、導入シーンとして薄霧に包まれた麦積山石窟の遠景が現れる。しだいに、視点が霧の中を石窟の断崖に向け前進して、コンテンツの中心となる第123窟の扉のあるところへと接近していく。第123窟の目前まで接近すると開扉し、画面が暗転して第2部へと移る。ここまでは、視点が自動的に移動するアニメーションパートとなっている。第2部では、明転すると第123窟内入り口に視点があり、窟内の中心に移動し、自由視点で観察することができる。視点の操作は、観察者がゲームパッドを用いて行うインタラクティブなパートとなっている。第3部は、窟内から外へ移動して第1部とは逆

に視点が後退し、森林の中で夕日に照らされた麦積山石窟を鳥瞰してコンテンツが終了する。第 1 部と同様に、第 3 部は視点が自動的に移動するアニメーションパートとなっている。以上のコンテンツの流れを図 4.4 に示す。

CG モデル構築から VR コンテンツの制作するにあたり、天水麦積山石窟芸術研究所に監修をお願いした。

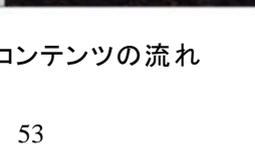
		<p>第1部</p>
		<p>アニメーション</p>
		<p>タイトル</p>
		<p>麦積山の遠景から 第123窟に 徐々に近づいていく</p>
		<p>第123窟の扉が開き 暗転</p>
		<p>第2部</p>
		<p>インタラクティブ</p>
		<p>第123窟の入り口 中央に移動し、 見渡せるようになる</p>
		<p>9体ある仏塑像を 個々に鑑賞</p>
		<p>第123窟より出る</p>
		<p>第3部</p>
		<p>アニメーション</p>
	<p>夕日に照らされた 麦積山より 遠ざかっていく</p>	

図4.4 VRコンテンツの流れ

4.4.2 インタラクションの設計

本コンテンツでは、前述した第2部の石窟内シーンで任意の視点から仏像を観察可能とするため、インタラクティブな視点操作を行えるようにした。石窟内に安置されている仏像の配置とそれぞれの仏像を詳細に観察する為に2種の視点を設定し、カメラの配置を行った。まず、石窟全体を一つの空間として把握し、塑像の配置を観察できる視点として、石窟中央に座標を固定したカメラ(Center カメラ)を設置した(図4.5)。つぎに、対象に接近して詳しく観察できる視点として、それぞれの塑像の近傍に観察対象の中心を基点に軌道回転するカメラ(Object カメラ)を設置した(図5)。



(a) Center カメラ



(b) Object カメラ

図4.5 視点のインタラクション

Center カメラの視点より、詳細に観察したい塑像を選択すると、選択された塑像に配置された Object カメラへと視点が移動するように設定を行った。他の塑像を観察したい場合には、一度 Center カメラに視点を戻し、観察したい塑像を再度選択するようにした。カメラ間の視点移動は、相互のカメラ座標を線形補間して、なめらかなカメラワークを表現した。視点の操作には、鑑賞者が直感的に扱えるよう汎用のゲームパッドを使用した。それぞれのカメラに設定された回転は十字キーに、塑像の選択と解除はそれぞれ異なるボタンキーに割り当てた。選択方法は、視点中心に選択したい対象のある時に選択ボタンを入力する。選択解除は、Object カメラの視点選択時に解除ボタンを入力する。上記2種の視点を用意し、操作にはゲームパッドをもちいることで、観察者は容易に石窟内全景を見回すだけでなく、さまざまな角度から塑像を詳しく観察可

能であった。

4.4.3 3D 映像表現

3D 映像の制作を行う際には、表現を効果的に使うために、2D 映像とは異なる様々な制約を知る必要がある。よく知られるものとして、書き割り効果、箱庭効果や画枠歪みが増えられ、立体視した際の再生像に対して違和感を覚える原因となる⁷⁾。また、これら 3D 映像特有の歪みは、立体感の欠如や臨場感の低下を生むだけでなく、観察者の眼精疲労の原因になる。文化遺産を立体視表現する際には、形状の再現性が特に重要であるため、歪みを極力抑制できるカメラ配置と呈示・観察環境の準備が必要となる。

(1) 3D カメラリグ設定

3D 映像を撮影するための左右カメラの設定方法として、交差法と平行法と呼ばれる 2 つの手法がよく使用される。この 2 つの手法は、2 台並べたカメラの光軸を被写体に対して、交差させるのか(交差法)、平行に保つのか(平行法)で区別される(図 4.6)。カメラを設置する台座はリグと呼ばれ、2 台のカメラをのせた 3D 映像制作用のカメラセットは 3D リグと呼ばれる。交差法では、左右カメラの光軸を交差させるために、キーストン歪みと呼ばれる幾何学歪みによるアーチファクトが発生してしまう⁸⁻⁹⁾。キーストン歪みのある 3D 映像は、左右像で縦方向の視差が発生するため、歪みの大きい映像では、眼精疲労の原因と成り得る。このアーチファクトは、撮影された左右画像に対してそれぞれ、ポストプロダクション処理で歪みに幾何学的に補正を施すことで、一定量の解消が可能である。一方、平行法では、左右カメラの光軸を平行に保つため、キーストン歪みを起こすことはない。しかし、撮影された映像をそのまま表示すると、浮き方向のみに 3D 映像が再生されてしまう。これは、それぞれ左映像は左に、右映像は右方向に、映像の表示位置をシフトすることで、適正な 3D 映像にすることができる。ただし、それぞれシフトした分の解像度が犠牲になる。近年の 3D 映像制作では、キーストン歪みのような、アーチファクトを完全に除去することができない歪みは発生しないことから、平行法が用いられることが多い。

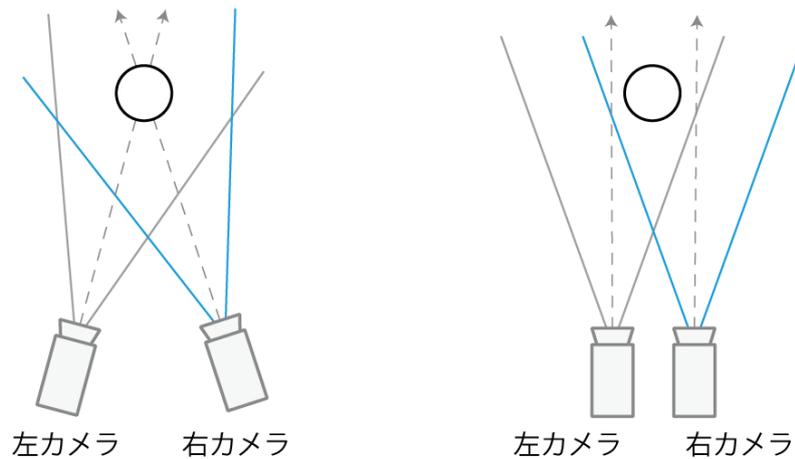


図4.6 3D映像の撮影方式(左:交差法、右:平行法)

CGでの3D映像のレンダリングは、現実のカメラのように撮像素子やレンズの物理的な影響を受けない。CGでは、立体感を調整する際にシフトする分の映像を余分にレンダリングすることも可能なために、3Dリグの設定には平行法が使用される。本システムでのVRコンテンツ内でも、3Dリグ左右のカメラは、平行法の配置になるよう配置した。しかし、リアルタイムレンダリングで3D映像を呈示する本システムでは、映像のフレームレートを維持するために、レンダリングする解像度を最小限にする必要がある。そこで、視差ゼロとなる仮想スクリーン面として設定し、左右カメラの仮想スクリーン面が一致するように、それぞれビューフラスタムを水平方向に変形しレンダリングを行えるように設定を行った(図4.7)。カメラのビューフラスタムで、キーストン歪みも解像度の不足もない3D映像をレンダリングすることができる。

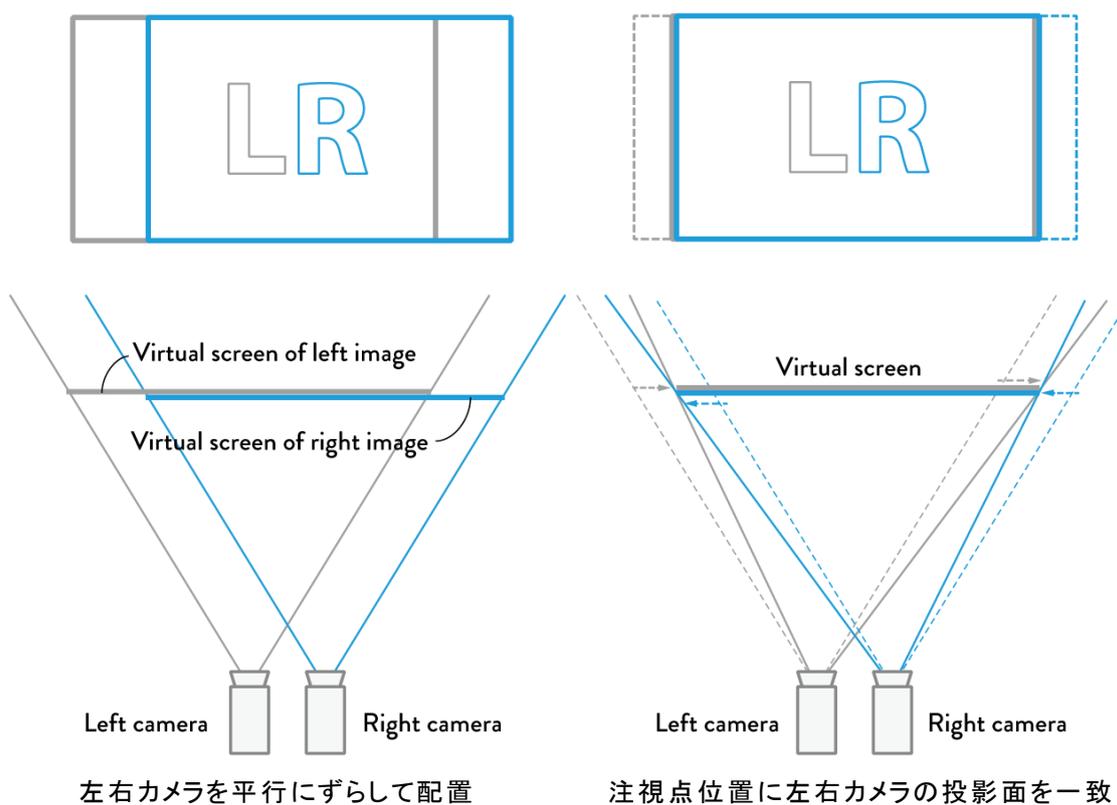


図4.7 レンダリング用の3Dリグ設定

(2) ラウンドネスファクターの維持

第2章で述べた通り、正しい形状を表現するためには、その立体感の再現性であるラウンドネスファクターを考慮することが不可欠である。ラウンドネスファクターが、 $R=1$ であれば実物と同じ立体感、 $R<1$ であれば実物よりも前後方向に立体感が圧縮され、 $R>1$ であれば実物より前後方向に立体感が誇張される。文化遺産の公開を目的とした場合には、形状情報を正しく伝えることが前提であるため、常にラウンドネスファクターが $R=1$ に近似した状態を保つことが必要となる。そのために、VR コンテンツの再生環境をもとにラウンドネスファクターが $R=1$ を維持できるように、VR コンテンツ内のカメラパラメーターを自動に算出できるように実装した。

具体的には、VR コンテンツの再生環境の計測を行い、以下の3点を設定する(図4.8)。

- 鑑賞者からスクリーン面までの視距離 (D)
- スクリーン上の投影サイズ (W)
- 鑑賞者の瞳孔間隔 (iD)

上記 3 点の設定パラメーターから、自動的に算出されたラウンドネスファクターが $R=1$ になるカメラパラメーターを算出し、VR コンテンツの起動時に反映されるようにした。

- 仮想スクリーンまでの距離 (D')
- 仮想スクリーンの横幅 (W')
- 左右カメラのオフセット量 (iD')

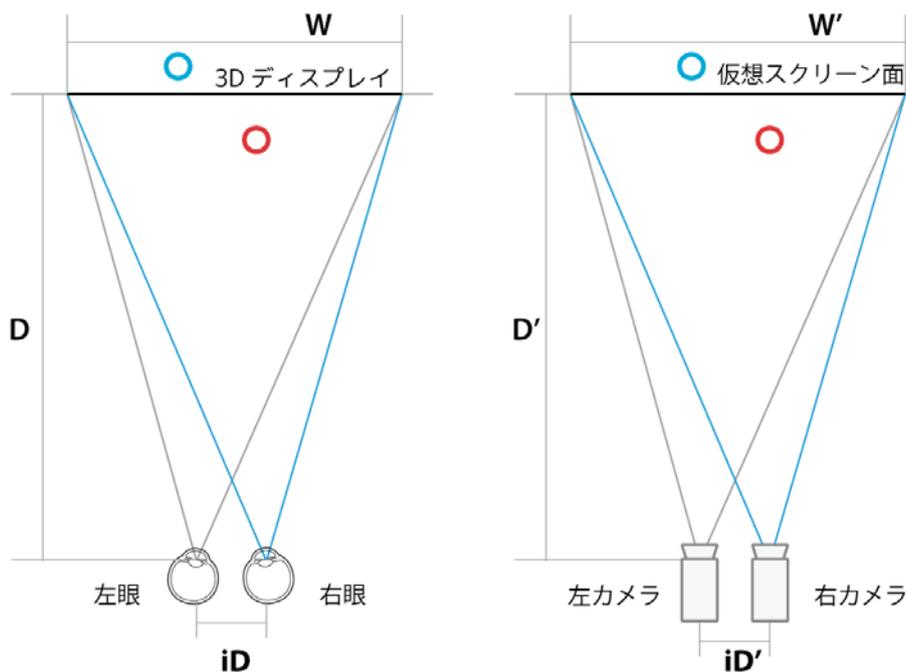


図4.8 VR コンテンツの再生環境とカメラ設定

(3) カメラアニメーション応じた調整

文化遺産に限らず、人が対象を鑑賞するときには、全体像を理解するために対象と距離をとって観察したり、部分を詳細に理解するために対象に近づいて観察したりするのが通常である。映像で言うと画面上に表示される対象を拡大・縮小する表現と対応する。2D 映像で拡大したり縮小したりする表現は、カメラの画角の変更であるズームイン・ズームアウトや、カメラと被写体までの距離の変更であるドリーイン・ドリーバックによって演出される。3D 映像の撮影では、このような平面映像の撮影と同じカメラ制御を行うと撮影環境と呈示環境の不整合をまねき、ラウンドネスファクターを $R=1$ に維持できず、上述した様々な歪みを作る原因となる。典型的な例として、ズームインを行う場合

には、再生環境の視距離に対して、カメラ設定における仮想スクリーンまでの距離が大きく、左右カメラのオフセット量が小さくなり、各対象の立体感が前後に圧縮され、書き割り効果と呼ばれる歪みが発生する。ドリーインをした場合には、逆に、再生環境の視距離に対して、カメラ設定における仮想スクリーンまでの距離が小さく、左右カメラのオフセット量が大きくなり、各対象の立体感が前後に誇張され、箱庭効果と呼ばれる歪みが発生する原因となる。しかし、大きさの異なる対象を立体視する時、これらのカメラワークを多用することになる。

そこで、麦積山石窟の VR コンテンツでは、対象の形状の歪みを最小限に表現するために、対象と観察者の関係をスケールすることで、映像中で文化遺産と距離をとる・近寄るといった映像効果を表現している。具体的には、視点を Center カメラから Object カメラに移動して「仮想スクリーンまでの距離」の値が小さくなる時、終着点となる Object カメラの「仮想スクリーンの横幅」、「左右カメラのオフセット量」の値を、Center カメラのそれと同じ比率を保つように他二つの値を設定する(図 4.9)。このように、鑑賞者が小さくなり、大きな VR シーンを見ているのと同様の効果を得ることで、対象を拡大するを表現している。それと同時に、単純に視点を接近させた時や画角を変更した時のような再生像の歪みや視差量の過多を最小限にすることができる。

先に紹介したように、実写による 3D 映像の撮影では、大きな建築物や風景などを空撮することは大変難しい。それは、カメラ間隔を物理的に広く設定することが困難であることに起因する。VR コンテンツでは、こうした制限は無いため、鳥瞰した遠景映像を表現することができる。麦積山石窟の VR コンテンツでも第 1 部・第 3 部に、上記の方法でドリーイン・ドリーバックさせることで、大きな対象の形状が把握できるように十分な立体感の表現を行った。

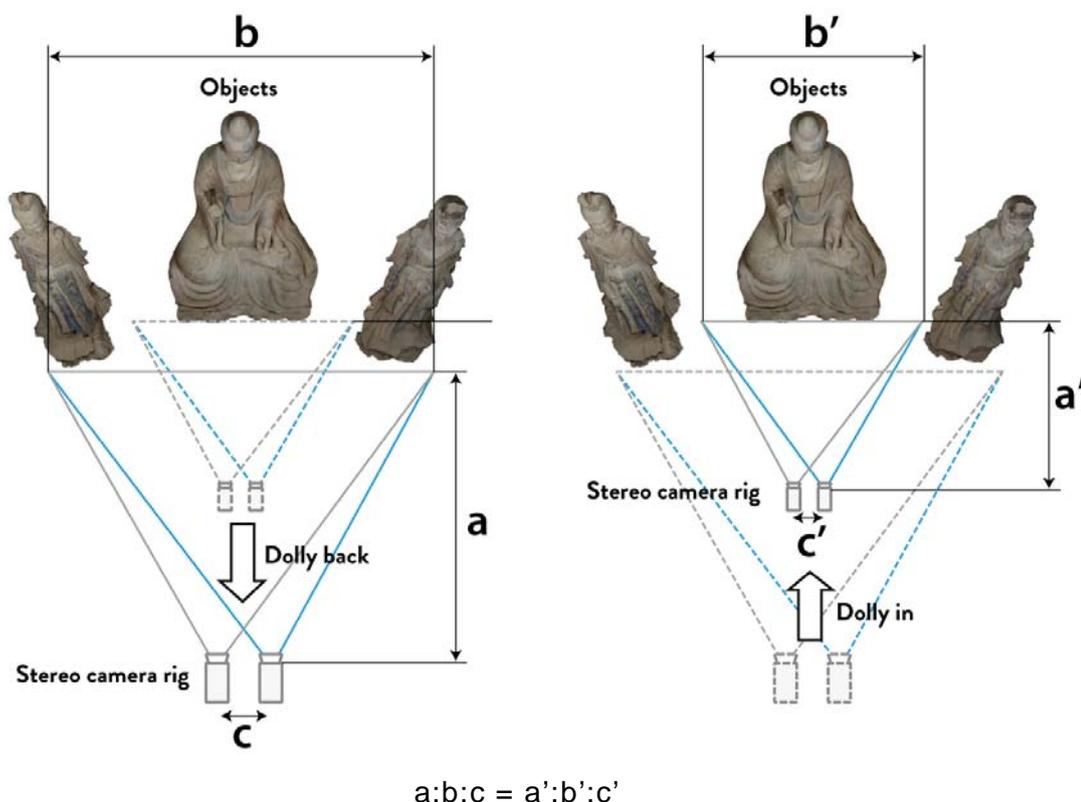


図4.9 拡大・縮小効果時のカメラ制御

4. 4. 4 呈示システムの構成

VR コンテンツを立体視し、インタラクティブな操作・鑑賞するために構築したシステムの構成を図 4.10 に示す。3D 映像の呈示には、偏光特性の異なるフィルターを取り付けた 2 台の XGA 液晶プロジェクター (EPSON 社 EMP-7800) を用い、それぞれ左眼用と右眼用映像を 100 インチのシルバースクリーンに投影する。鑑賞者は、偏光グラスを装着して 3D 映像を鑑賞する。コンテンツの操作に応じた左眼用と右眼用映像は、2 台のワークステーションを用いて、それぞれリアルタイムにレンダリングを行う。レンダリング用ワークステーションには、Intel 社 Xeon CPU と nVidia 社 QuadroFX GPU 搭載の Dell 社 Precision630 を使用している。また、2 台のワークステーションは、搭載された nVidia 社 Quadro G-Sync¹¹⁾ のフレームロック機能を用いて、ハードウェアレベルで映像のフレーム同期を確保している。また、映像のフレームレートは、コンテンツ制作時に調整を行い、50fps 以上を維持できるようにしている。コンテンツ再生時の操作は、ゲームコントローラーの十字とボタンのみを使用して、初めての鑑賞者でも手元を確認せずに直感的な操作が行えるように設定した。

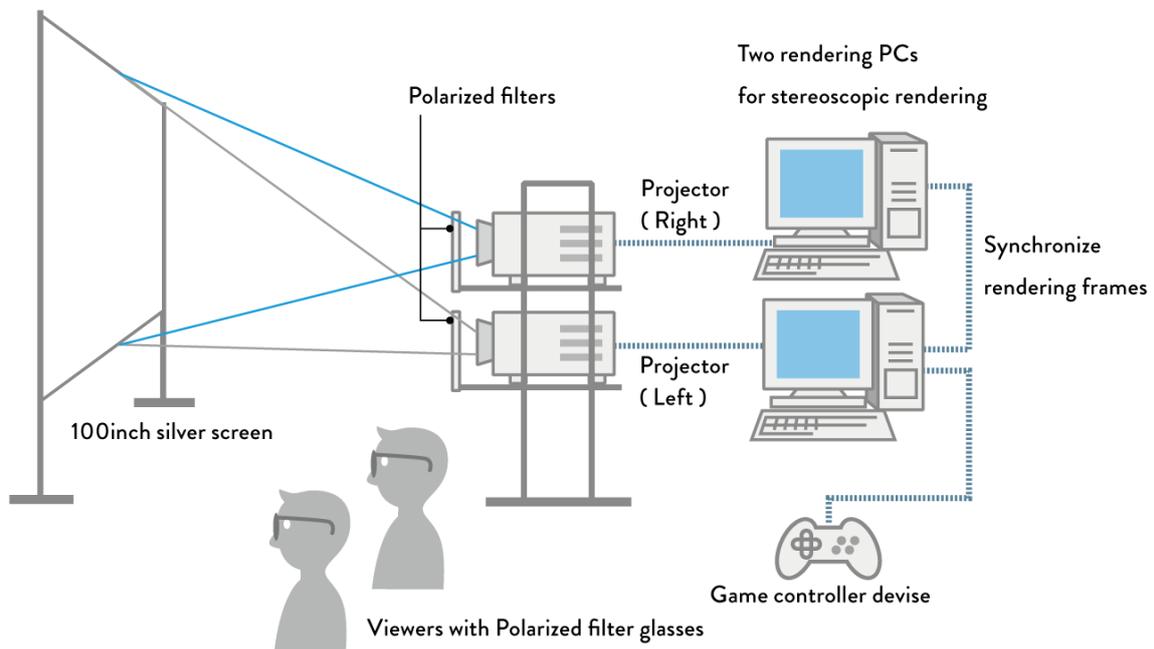


図4.10 呈示システム構成

4.5 VRコンテンツの評価

制作した VR コンテンツの立体感を評価するために、立体視表現された映像についてアンケート調査を行った。評価用コンテンツは、鑑賞する映像を統一するため、VR コンテンツのインタラクション部分を動画にした。VR コンテンツは、ホームシアターサイズでの視聴を想定しているため、市販されている 3D ディスプレイで最も大型の 46 インチでの鑑賞を想定したカメラ設定を行った。

4.5.1 評価用コンテンツの制作

立体感の評価に使用する 3D 映像は、上述 VR コンテンツを用いて作成した。具体的には、まず高精細な VR コンテンツに呈示環境に適した立体視の制御用カメラパラメーターを設定し、リアルタイムレンダリングされたフレームをキャプチャして、左右眼用の動画を作成した。評価用コンテンツは、後述の再生環境に合わせ、それぞれ左眼映像をフレーム上部、右眼映像をフレーム下部に配した 1920×1080pixel の動画を作成した。立体視に関わる表現は、VR コンテンツと同様に調整されている。

4.5.2 評価用コンテンツの映像構成

VR コンテンツと同様に 3 部構成となっており、第 1 部と第 3 部は同じカメラアニメーションとなっている。VR コンテンツではインタラクティブな操作が可能であった第 2 部については、窟内の塑像を一通り観察できるように構成した。石窟内で見所となる、部分については接近した視点や、じっくりと回り込むような視点を取り入れた。編集後の評価用コンテンツは、全編で約 9 分程度になった。

4.5.3 評価方法

制作した麦積山石窟の評価用コンテンツは、早稲田大学で行われた「テクノフェア 早稲田」にて 2008 年 10 月 31 日と 11 月 1 日の 2 日間展示を行い、コンテンツを鑑賞した来場者へのアンケートを実施した。コンテンツ映像の表示には、市販されているもののなかで HYUNDAI IT JAPAN 社製 46 型 3D 液晶テレビ（解像度 1920×1080pixel）¹²⁾を使用した。また、映像の再生には、Intel 社 Core 2 Duo CPU と AMD 社 Radeon GPU を搭載した Dell 社製デスクトップ PC を使用した。再生ソフトは、TriDef Media Player¹³⁾を使用した。映像は、ハイビジョンテレビの標準的な視聴距離とされる 3H（約 1.7 メートル）とおおよそ同等の距離から鑑賞してもらった。

アンケートは、年齢（年代単位）、性別、3D 映像を鑑賞した際の印象についての問いと自由記述欄を A4 用紙一枚にまとめ、鑑賞後に記入してもらった。印象についての問いは、以下の 10 項目について、当てはまらないを 1、非常に当てはまるを 7 とした単極尺度からなる 7 件法で回答してもらった。（エ）（オ）（カ）（ク）（コ）の 5 項目は、逆転項目とした。

- | | |
|---------------|---------------|
| (ア) 臨場感がある | (カ) 違和感がある |
| (イ) スケール感がある | (キ) 実物のように見える |
| (ウ) 立体感がある | (ク) 像が二重に見える |
| (エ) 酔う・めまいがする | (ケ) 画質がいい |
| (オ) 迫力がない | (コ) 目が疲れる |

鑑賞中には、麦積山石窟について簡単に説明を行い、適宜、必要に応じて 3D 映像に原理などの質問に答えた。

4.5.4 結果と考察

来場者にコンテンツを鑑賞してもらい、62名に作品評価のためのアンケートを実施し、うち59名(性別・年齢の記入漏れ3名を含む)から有効な回答が得られた。性別と年齢の割合について、アンケートの集計結果を以下の表に示す。

表4.1 回答者数内訳(記入漏れ3名を除く)

性別と年代	人数	性別と年代	人数
男性 10代	0名	女性 10代	3名
男性 20代	13名	女性 20代	4名
男性 30代	10名	女性 30代	1名
男性 40代	4名	女性 40代	0名
男性 50代	10名	女性 50代	1名
男性 60代	10名	女性 60代	0名
男性合計	47名	女性合計	9名

映像の印象に関する項目において得られた回答について、アンケートの集計結果を図4.11に示す。大多数の鑑賞者が、(ク)「像が二重像に見える」に低い得点を付けていることから、正しく立体視できていたと推測される。また、立体感や臨場感などのポジティブな印象についての項目は、多くの鑑賞者が高い得点を付けた。一方で、目が疲れるや映像に酔うなどといった3D映像鑑賞の際に問題となるネガティブな印象についての項目では、多くの鑑賞者が低い得点を付けた。特に違和感の少なさや実物らしさの項目でも、大多数の回答者から高い得点が得られたことで、コンテンツの再現性に対する高い信頼が確認できた。

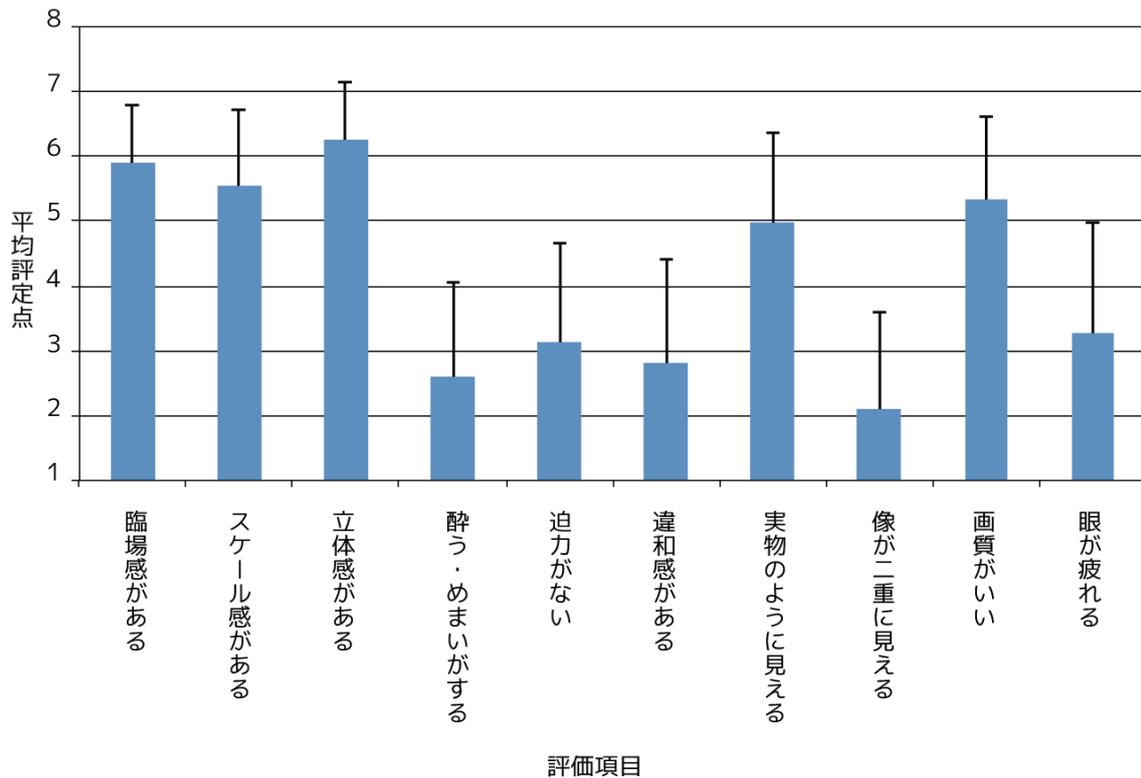


図4.11 アンケート結果

目の疲労に関する項目で、高い得点を付けている回答者は、(エ)「酔う・めまいがする」または(ク)「像が二重に見える」でも高い得点を付けており、映像に対する酔いや3Dディスプレイの左右像分離が不完全であったことが、3D映像鑑賞時の視覚負担となっていたと推察される。そのため、カメラワークなどの演出や、3D映像の呈示機器について、さらなる配慮の必要性が示唆された。

また、(ケ)「画質がいい」の項目でも、大多数の鑑賞者が高い得点を付けており、VRコンテンツから生成した動画でも、画質面での問題はあまり見られないことが確認された。しかし、(カ)「違和感がある」で高い得点を付けた回答者の中で、自由記述において第1・3部と第2部とのCGモデルのクオリティの差異についての言及が数例みられた。このことから、CGモデルのクオリティの差異は、鑑賞時にある違和感を助長することが推察され、制作するコンテンツ内でのCGモデルのクオリティの均一化をおこなう必要性が示唆された。

4.6 まとめ

本章では、大規模な文化遺産のデジタルアーカイブを呈示する際の 3D 映像表現について検証するために、中国麦積山石窟を対象に 3 次元デジタルアーカイビングと VR コンテンツの制作を行った。制作した VR コンテンツでは、麦積山石窟第 123 窟を中心に 3D 映像による表現を取り入れ、インタラクティブな操作によって文化遺産を仮想体験するシステムを構築した。また、3 次元デジタルアーカイブしたデータを用いて、ラウンドネスファクターを意識した 3D 映像表現したことで、実写では難しい大きな対象の鳥瞰の視点や歪みの少ないズームング効果を可能とした。

アンケートによるコンテンツの評価を行い、違和感の少なさや実物らしさの項目で高い評価が得られ、コンテンツの再現性に対する高い信頼が確認された。また、立体感、臨場感、スケール感の項目についても高い評価が得られたことで、3D 映像表現を用いることで大規模な文化遺産でも、形状や雰囲気表現することの有効性が示唆された。一方で、ごく少数ではあるが、目の疲れや酔いを報告する鑑賞者もあり、カメラワークなどの演出や鑑賞位置の指示について、さらなる配慮が必要であることが示唆された。

また、本研究で実践した VR コンテンツを利用しての高精細な 3D 映像の生成は、カメラパラメーターの試行錯誤の回数が多くなりがちな 3D 映像コンテンツ制作時において、リアルタイムに立体感の確認ができ、3DCG アプリケーションを使用して制作するよりも大幅に制作時間が短縮できた。これによって、容易に呈示環境に合わせたスケラブルなコンテンツの出力が可能である。よって、多様な呈示環境へ対応した 3D 映像を制作する際の、利便性の高い方法を提案することができた。

本研究で制作した VR コンテンツによる 3 次元デジタルアーカイブの活用を博物館展示など一般へ広めるためには、次のような課題がある。まず、CG モデルの制作で手作業によるモデリングを用いている部分を自動化し、VR コンテンツ制作のさらなる簡便化があげられる。つぎに、インタラクティブ操作が可能な VR コンテンツの呈示システムの簡略化があげられる。また、博物館展示などのように幅広い鑑賞者を対象とする場合に、より安全な 3D 映像表現についても検討が必要である。

4.7 参考文献

- 1) 麦積山石窟芸術研究所: <http://www.maijishan.com.cn/>

- 2) 天水麦積山石窟芸術研究所編：中国石窟 麦積山石窟；平凡社（1987）
- 3) Leica Geosystems: <http://www.leica-geosystems.com/>
- 4) 北京天遠三維科技有限公司: <http://www.3dscan.com.cn/>
- 5) Geomagic, Inc.: <http://www.geomagic.com/>
- 6) Autodesk, Inc.: <http://www.autodesk.co.jp/>
- 7) 原島博監修：3次元画像と人間の科学；オーム社（2000）
- 8) 山之上裕一，永山克，尾藤峯夫，棚田詢，元木紀雄，三橋哲雄，羽鳥光俊：
立体ハイビジョン撮像における左右画像間の幾何学的ひずみの検知限・許容限
の検討，電子情報通信学会論文誌 D-II, J80-D-2(9), pp.2522-2531, 1997
- 9) 山之上裕一，永山克，尾藤峯夫，棚田詢：立体ハイビジョンにおける無ひずみ
撮像・観察条件，映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.3, pp.377-383, 1998
- 10) nVidia 社 Quadro G-Sync :
http://www.nvidia.co.jp/page/quadrofx_gsync.html
- 11) HYUNDAI IT JAPAN 株式会社: <http://www.hyundaiit.jp/>
- 12) Dynamic Digital Depth: <http://www.ddd.com/>

第5章 シアター型 3D 映像による文化遺産アーカイブ表現の検討

5. 1 本章の目的

本章では、文化遺産を記録した映像資料の 3D 映像表現についての検討を行う。文化遺産は、映像によって記録されることが多い。特に建築物や遺跡などといった、大型の文化遺産については、その状況などを映像によって伝えられることがよくある。研究用の資料映像として記録されていたり、テレビ番組などの映像として記録されたりと、用途は様々であるが映像資料としてアーカイブされ蓄積されている。近年では、3D 放送用テレビ番組として文化遺産を対象とした 3D 映像コンテンツも存在するが、現在までに蓄積されている文化遺産の映像資料のほとんどは、通常のカメラで記録された 2D 映像である。こうした多岐にわたる文化遺産の映像資料を 3D 映像化することによって、2D 映像での鑑賞とは異なった体験を得られ、新たな付加価値をあたえることができると考える。また、3D 映像コンテンツの不足している現在、既存の映像資料アーカイブを利用した文化遺産コンテンツは、訴求性の高いものであると考えられる。

また、3 章と 4 章では、鑑賞者が 1 人または少人数を対象とした公開システムと表現方法について検討した。大型の展覧会や展示施設では、同時に多数の鑑賞者が 3D 映像の文化遺産を体験できるシステムも必要である。そこで本章では、制作した 3D 映像コンテンツの上映環境をシアター型とすることで、多数の鑑賞者を想定した 3D 映像表現とその制作方法についても検討を行う。3D 映像では、再生される映像が視聴位置によって、幾何学的に歪みが生じて立体感が異なることが知られている¹⁻⁴⁾。多くの鑑賞者に向けて上映されるシアター型コンテンツでは、一つのスクリーンに対して座席数を確保する必要があるため、3D 映像を鑑賞するのに最適ではない座席位置も存在する。そこで、制作したコンテンツの評価の際に、座席位置の違いが 3D 映像への印象に影響するかについて検討を行う。また、第1章で述べた通り、3D 映画ブームによる 3D 映画上映館の増加や 3D 映画公開数の増加しており、文化遺産アーカイブ以外でもシアター型のコンテンツの制作方法や 3D 映像表現については、応用範囲の広い研究分野といえる。

具体的には、3D 映像コンテンツの立体感について客観的な評価指標を用いて時系列的に分析を行い、安全かつ快適なコンテンツの制作を目指す。今後、多くのコンテンツ制作の現場で利用が見込まれている 2D/3D 変換技術と、CG のステレオレンダリングによるステレオ撮影との 2 つの異なる制作手法を組み合わせた 3D 映像コンテンツによる影響について調査する。立体感について客観的な指標として視差角 (Parallax angle) をもちい

て、定量的な基準で安全かつ快適なコンテンツの制作を行うとともに、一定の再現性を保持した。さらに、制作されたコンテンツに対して、時系列的な視差角の分析による両眼立体情報の設計・制御と主観評価を行い、制作者ならびに視聴者の視点から、その特性について検討を行うことを目的とした。

5. 2 2D/3D 変換

2D/3D 変換とは、自動または手作業による映像処理によって、2D 映像を 3D 化する技術の総称で、近年、3D コンテンツの制作で広く用いられるようになってきた¹³⁾。実際に 2D/3D 変換技術が利用された作品としては、"Alice in Wonderland " (2010) や "Clash of the Titans " (2010) などの 3D 映画があげられる。どちら作品も興行的に成功しており、また、比較的新しい要素であるため技術進歩も目覚ましく、2D/3D 変換を制作に用いた作品は年々増えている(図 5.1)。3D 映像制作において、注目の技術である。

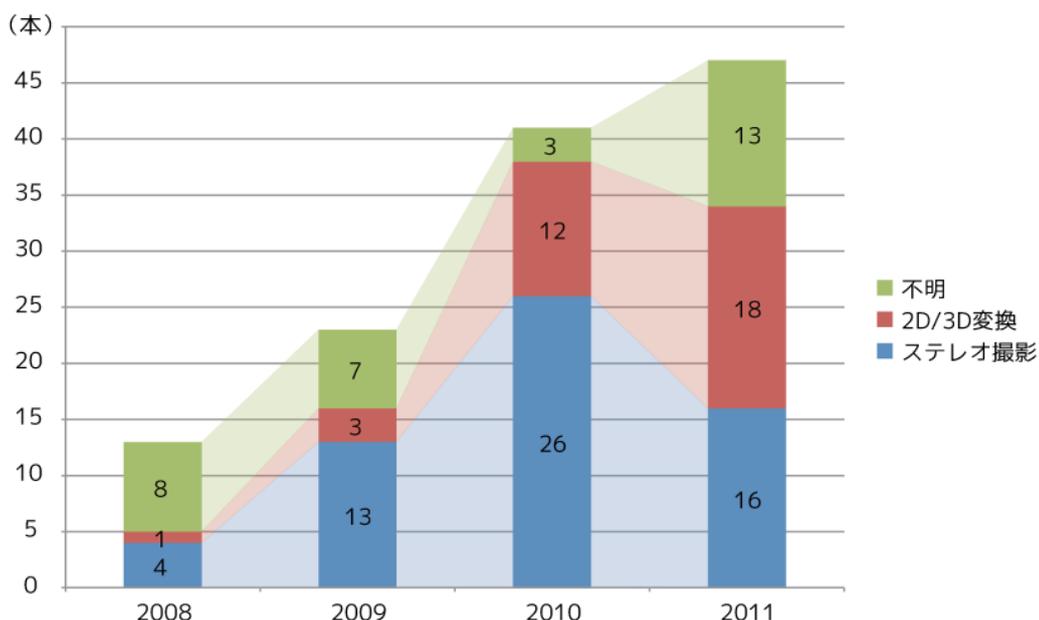


図5.1 3D 映画公開数の推移と製作手法 (2008-2011) www.3dmovielist.com¹⁴⁾

2D/3D 変換の技術は、複雑な画像処理からなる。元来、人は様々な情報を手がかりとして、空間像を知覚している。第 2 章で述べた通り、空間知覚を助ける立体情報は、単眼立体情報と両眼立体情報との二つに大きく分類される。2D 映像にも、運動視差や単眼立体情報は記録されており、鑑賞者は映像内の空間を知覚することが出来る。ステレオカ

メラによって撮影される 3D 映像には、両眼立体情報の一つである「両眼視差」が記録されており、より豊かな空間表現が可能である。2D/3D 変換では、2D 映像から推定される「両眼視差」を、画像処理によって付加することで 3D 化している(図 4)。2D/3D 変換は、撮影後に 3D 化が行われるため、通常の 2D コンテンツ制作で蓄積されたノウハウを活用した、制約の少ない撮影や視覚表現が可能であるとされる。また、その特性から既存の 2D コンテンツでも 3D 化することが出来るといったメリットもある。すでにコンテンツとして成立している 2D 映像を、2D/3D 変換技術によって 3D 化することで、新たな 3D コンテンツとして供給することも可能である。

しかし、2D/3D 変換には、2D 映像から推定された両眼立体情報を後付けするために、単眼立体情報との間に矛盾を生じやすいという問題もある。通常は 2 つのカメラで撮影することで得られる情報を、1 つのカメラのみで撮影した映像から推定することになるので、前景に遮蔽されたエリアの補完など課題が多い。しかし、2D/3D 変換により制作されたコンテンツが、左右 2 視点のカメラにより撮影・生成されたコンテンツと比べ、視聴者の体験に、どのような差異があるかについて研究されておらず、明らかとなっていない。

5. 3 視聴位置による立体感の変化

第 2 章で述べた通り、3D 映像を鑑賞する際、ユーザーの座席の位置によって、スクリーン面からの視聴距離が変化する。そのため、鑑賞できる 3D 映像は、再生像の形状の歪みは、ユーザーごとに異なるといえる。特に、シアターのような多くの座席を有する環境では、ユーザーごとの視聴距離や角度の差異が大きな範囲に及ぶため、再生像の形状の歪みについても差異が認められるであろうと考えられる。3D 映画などの一般的な 3D 映像コンテンツでは、3D 映像による演出や体験を愉しむのものであって、多少の歪みについては許容されている。しかしながら、文化遺産の 3D 映像コンテンツにおいては、形状情報そのものが重要であり、座席によって視聴位置が異なるために歪みを生じ、人によって受ける印象に違いが生じることは好ましくない。そのため、座席によって印象に違いのない 3D 映像を制作するための検討が必要である。また、印象に違いが生じるのであれば、どのような条件で、どの程度の違いが生じるか検証する必要がある。

こうした 3D 映像の歪みについては、視差量が大きくなれば、画面上の面積に閉める歪みの割合も大きくなることから、視差量を一定の範囲内に収めれば、歪みについても影響のでない範囲に収めることができるのではないかと推測される。

5. 4 3D 映像と生理的制約

安全性が担保され、かつ快適な 3D 映像を制作するためには、生体影響に関して考慮する必要がある。3D 映像の観察時に眼精疲労を生じるような要因として、生理的な制約と知覚的な制約がある。知覚的な制約は、ホロプター⁵⁾や Panum の融像領域⁶⁾、Percival の快適視域⁷⁾などの対象が 1 つに見える、あるいは快適に観察可能な奥行き範囲に関連している。これらの制約を逸脱した場合、両眼視が困難となり、眼精疲労を生じることが確認されている⁸⁾。生理的な制約として、視覚系の不整合があげられる。生理的制約の視覚系の不整合とは、主に観察中に輻湊が再生される立体像の位置に働くのに対し、調節は画面近傍に固定されるという、調節と輻湊の奥行き情報が一致しないことをいう(図 5.2)。この調節と輻湊の不一致は、自然視の状態と異なり、立体視特有の状態であることから、3D 映像の観察時の眼精疲労の主原因として問題にされることが多い⁹⁾。

3D 映像観察時における視覚系の不整合の度合いは、画面上での左右像のズレ量、視距離と瞳孔間隔で決まる。視覚系の不整合の度合いを定量的にあらわす指標として、しばしば視差角が使用される。視差角とは、画面を注視する際の輻湊角(θ^1)と融像した立体像を注視する際の輻湊角(θ^2 、 θ^3)の差を表したものである(図 5.3)。視差角は、対象の視差が交差方向の場合は負の値を、同側方向の場合は正の値をとる。この視差角が大きくなればなるほど、輻湊と調節の不一致は大きくなるため、眼精疲労を早期に感じる可能性が高くなる。3D 映像コンテンツ制作の現場では、視差角のほかに左右像のズレ量をピクセルまたは画面の横幅に対する割合で、視覚負担の指標とする場合がある。指標としてズレ量を用いる場合には、観察時の視距離、画面サイズを別に定義する必要がある。これらのパラメーターによって、視覚負担が大きく異なってしまう。逆に観察する環境が定まっていない場合には、視差角を指標として用いることはできない。

安全かつ快適に 3D 映像を制作するためには、上述の指標を用いて許容範囲を設定することが必要である。井上らは、視差角の異なる立体映像を呈示した際の眼球運動を測定し、視差角 ± 1 度以内であれば、視覚系に負担が少ないと報告している¹⁰⁾。前述の「3DC 安全ガイドライン」でも、快適な 3D 映像を楽しむためには、視差角を ± 1 度以内に収めて制作するように推奨されている。また、花里らはカット毎の急激な視差量の変化も見づらさに影響するとしており、短時間での輻湊運動が大きく働くことで眼精疲労の度合いが増すと推察される¹¹⁾。3D 映像コンテンツの制作者は、3D 映像による生体影響について考慮した制作が求められる。

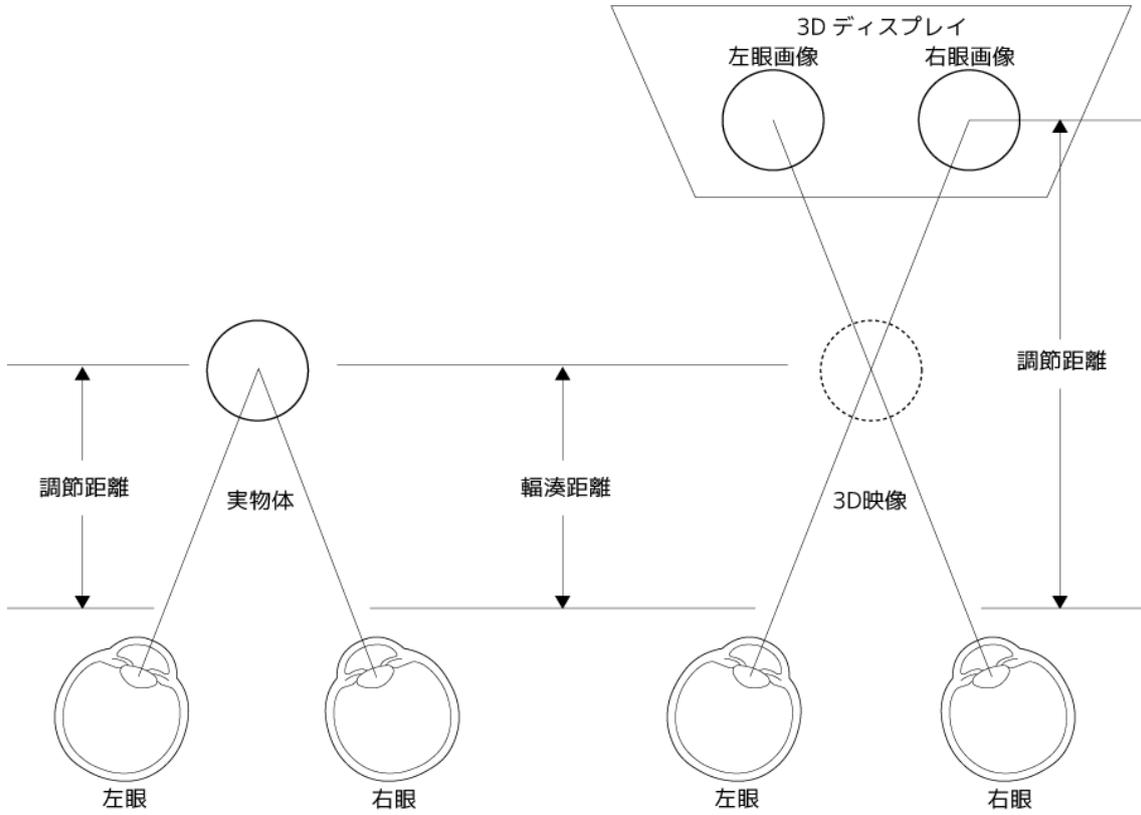


図5.2 3D映像観察時の調節と輻湊の不一致

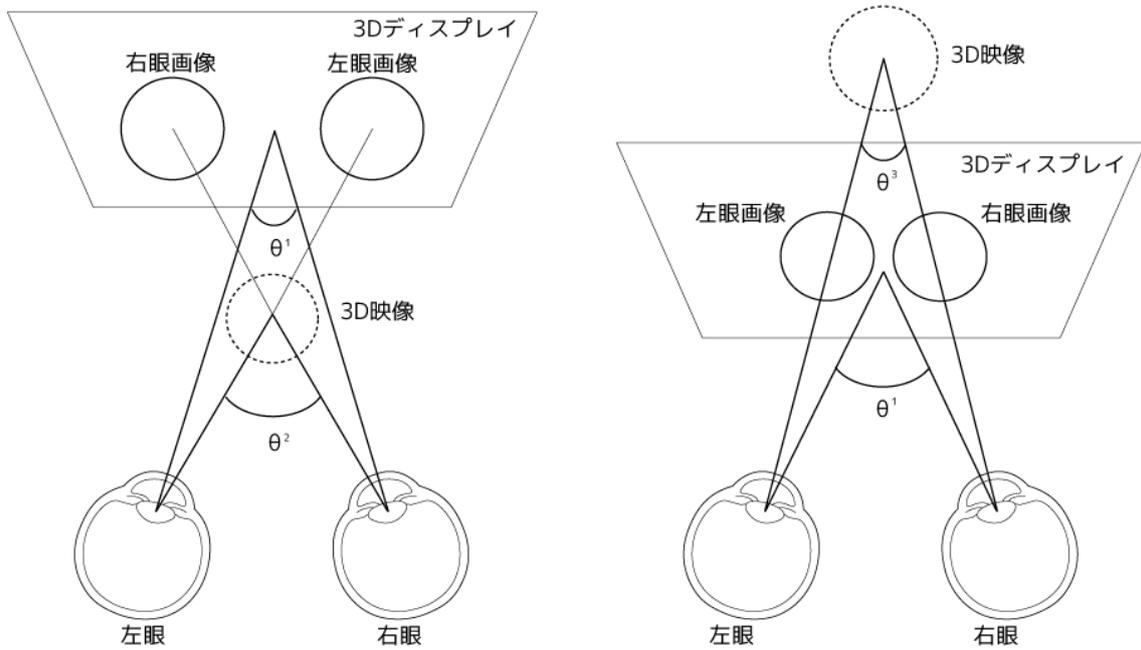


図5.3 視差角（交差方向： $\theta^1 - \theta^2$ 、同側方向： $\theta^3 - \theta^1$ ）

5. 5 シアター型 3D 映像コンテンツの制作

5. 5. 1 「黄金の都シカン」展

「黄金の都シカン」展は、国立科学博物館 (National Museum of Nature and Science, Tokyo) において、2009 年 7 月 14 日から 10 月 12 日の会期で行われ、20 万人以上の来場者が訪れた¹⁵⁾。展覧会は、プロローグ、第 1 部、第 2 部、エピローグから構成され、インカ文明のルーツともされるシカン遺跡について紹介している。展示内容は、南イリノイ大学の島田泉教授が行ったシカン遺跡の発掘調査の足跡と、シカン遺跡から出土した遺物の展示からなる。展覧会では、エピローグの展示の後に、3D シアターが設置されシカン遺跡に関する 3D コンテンツを鑑賞できる。3D 映像コンテンツの内容は、島田教授の行ってきた数十年にも渡る発掘調査を記録した映像や、CG で再現された遺跡を説明するものである。これらを臨場感豊かに来場者に体験してもらうことを目的として、3D 映像によるコンテンツとした。筆者らは、上記シカン展の 3D コンテンツの制作を担当した。

5. 5. 2 3D コンテンツの上映環境

3D シアターでの上映は、ハイビジョン DLP 方式プロジェクター (Panasonic PT-DZ6700, 1920 x 1200 pixels) 2 台を用いて、左右の映像を直線偏光方式で 300inch スクリーンに投影した。鑑賞者は、偏光メガネを着用し 3D 映像を鑑賞した。座席数は 100 席程度で、最前列はスクリーンから 5.5m、最後列は 9.25m の位置に設計されており、立見も可能でスクリーンからの距離は 10m となる。図 5.4 に上映環境を示す。

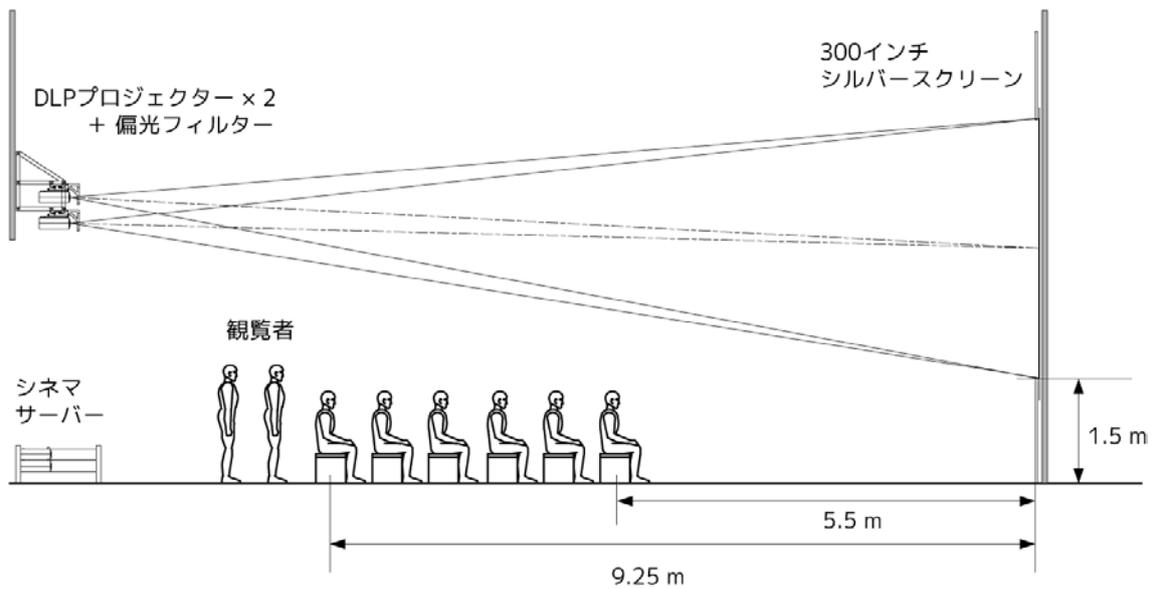


図5.4 上映環境

5. 5. 3 映像資料からのコンテンツの3D化

3Dシアターにおけるコンテンツの特徴は、過去に撮影されたシカン遺跡の発掘現場の実写素材と、遺跡を復元したCG素材をそれぞれ3D化し、質的に異なる素材を奥行き感という尺度で統制をとり、新しい3D映像コンテンツとして再構成したことにある(図5.5)。前章でも述べてきたとおり、3D映像は撮影する機材やその対象までの距離や大きさなど撮影環境によって記録される視差量は異なる。映像毎に視差量が異なれば、再現される奥行き感(ラウンドネスファクター)が異なってしまい、同一の対象が映っていても鑑賞者が受ける印象は大きく変わる。質的に異なる素材であっても、視差量をコントロールし、奥行き感という尺度において統制を取ることによって、映像のつながりに違和感のない3D映像コンテンツとすることができると考えられる。

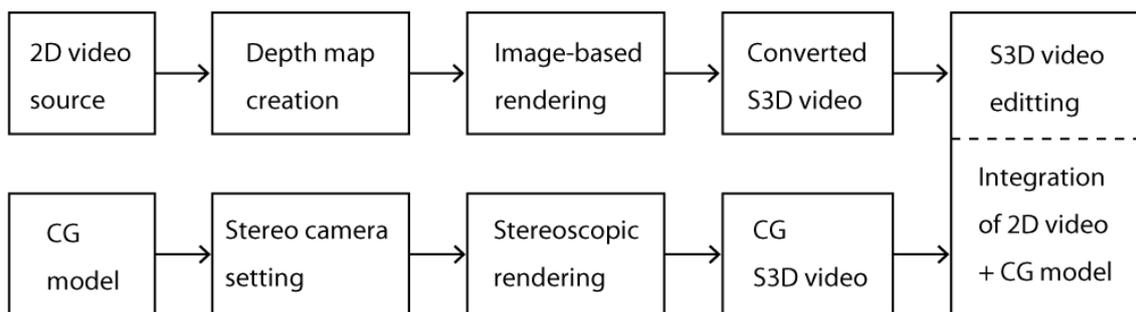


図5.5 シカン展の3Dコンテンツ制作のワークフロー

実写素材には、撮影時期によって SD (Standard Definition) 画質と HD (High Definition) 画質の異なるサイズの映像がある。最終的なコンテンツは、上映環境に合わせ、近年の映像コンテンツ制作では標準となっている HD 画質であり、HD 画質のコンテンツ中に、SD 画質のサイズを HD 画質に拡大した映像を使用すると、相対的に画質の荒さが目立ってしまう。そこで、SD 画質の素材については、1画面に複数の映像を並べて使用するなどして、カット間での画質の違いに違和感を覚えないように配慮した。実写で撮影されている素材の内容は、発掘現場の様子と、遺跡の現在を空からとらえた様子、博物館で収蔵されている出土品を撮影したものである。一方、CG 素材については、以前、テレビ番組で使用するために制作されたモデルデータを使用した。オートデスク社の CG 制作ソフトウェア Autodesk Softimage¹⁶⁾を使用して、カメラワークを設定し、HD 画質でレンダリングを行った。CG 素材の内容は、主に遺跡の外観の復元映像と、遺跡内の埋葬の様子などの再現映像とで構成される。

これらのシカン遺跡に関する多岐にわたる映像資料をもとに、発掘風景とその場所の復元・再現映像を交えて、遺跡の 20 年間の発掘の軌跡をたどりながら、出土品などから解明された文化的成果を解説する内容とした。そのため、質の異なる映像が交互につながりながら、ストーリーが進んでいく構成となっている。図 5.6 に、制作したコンテンツの内容と使用した映像の種別、映像のタイムコードを示す。図中の背景が、白地の映像は SD 画質または HD 画質の実写素材を、グレー地の映像は CG 素材を使用した部分となる。制作したコンテンツの再生時間は、本編映像の他にタイトルとエンドロールを含み、約 10 分の作品である。

0:00 実写(SD)	3:44 CG	6:30 CG
0:19 CG	4:13 実写(SD)	8:57 実写(HD)
0:43 実写(SD)	4:31 実写(HD)	8:04 実写(HD)
1:04 CG	4:39 CG	8:21 実写(SD)
2:38 実写(SD)	4:44 実写(HD)	8:31 CG
2:59 CG	5:42 CG	8:56 実写(HD)
3:38 実写(HD)	6:16 実写(HD)	9:08 CG

図5.6 制作したコンテンツの流れと使用した映像の種別（グレー背景はCG素材）

2D で撮影・制作された既存の映像資料から 3D 映像コンテンツを制作するために、実写素材と CG 素材で異なる手法を用いた。まず、SD 画質と HD 画質の実写素材については、それぞれ対して手作業による 2D/3D 変換技術による 3D 化を行った。具体的には、作業者が各カットにおける 2D 映像内のオブジェクトのセグメントとそれぞれの奥行き感を判断し、その奥行き情報をピクセル単位でデプスマップとして描画し記録してゆく。描画されたデプスマップをもとに、2D の実写素材に両眼視差情報を付加し、左右眼用の映像に分離して 3D 映像素材の生成を行った(図 5.7)。2D/3D 変換では、遺物の形状をディレクターや識者と確認しながら作業を行い、発掘現場の 3 次元情報を再現する上で矛盾のない自然な 3D 映像表現を目指した。また、1画面に複数の映像を並べる際には、3D 映像の特徴を生かし、映像を 3 次元的に配置する、影や背景をつけるなど、表現を行った。

次に CG 素材については、既存の CG モデルデータに対して、カメラワークのアニメーション設定を行った。アニメーションされたカメラをもとに、左右方向に位置をずらした 2 台からなるステレオカメラリグを配置し、ステレオレンダリングを行った。CG 素材の視差の量調整は、ステレオカメラリグの間隔を増減させることで調整した。第 4 章で検討したように、遺跡を鳥瞰するアングルや対象にトラックしていくような演出時には、ステレオカメラリグの間隔を調整することで、十分な立体感を得られるようにした。

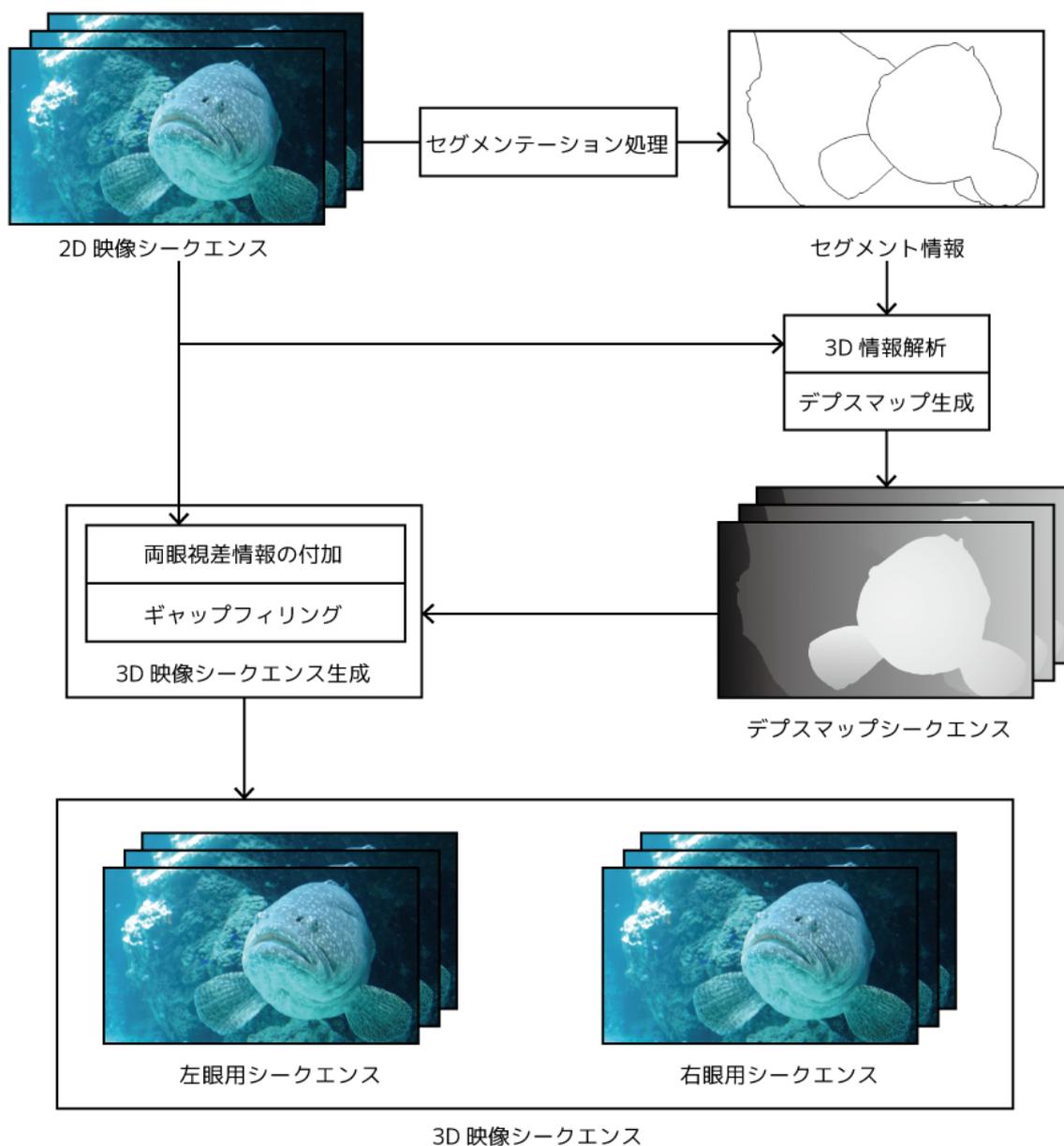


図5.7 2D/3D 変換ワークフローの一例

5. 5. 3 視差角の解析と制御

視差角の解析には、岸らが提案した 3D コンテンツの評価手法¹⁷⁾を用い、上映環境のスクリーンサイズ 300 インチ、観察距離 5.5m を設定し、毎秒の視差角を求めた。視差角は、オプティカルフローによる画像処理で各ピクセルについて左右像の対応点間の距離(視差量)を算出し、設定された上映環境から視差量を視差角に変換を行っている。制作した 3D コンテンツにおける、視差角の解析のフローを図 5.8 に示す。3D 化された左右画像を解析することで、視差量をグレースケールで表現したディスパリティマップ(Disparity

map)と呼ばれる画像を得ることができる。明るい部分が手前、暗い部分が奥というように画像内の視差の分布を表している。上映環境を入力することで、このディスパリティマップから視差角を算出することができる。算出した視差角から、コンテンツのストーリー展開に応じた両眼立体情報の増減や、実写素材とCG素材でのカット間のつながり、既存のガイドラインへの適合性などを考慮して、立体感の設計・制御を行った。当該コンテンツの時系列の視差角変化を、図 5.9 に示す。

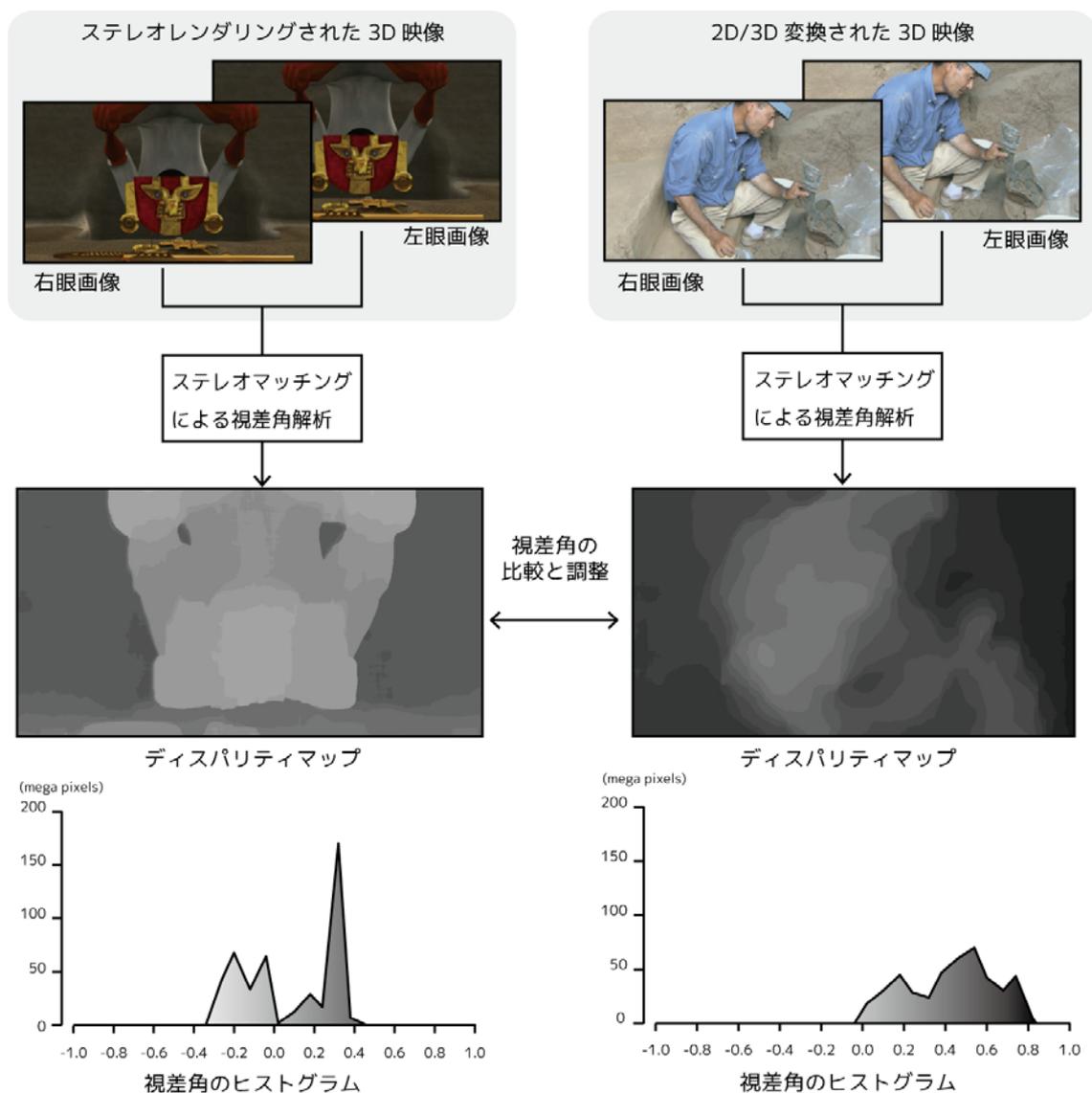


図5.8 解析されたディスパリティマップ

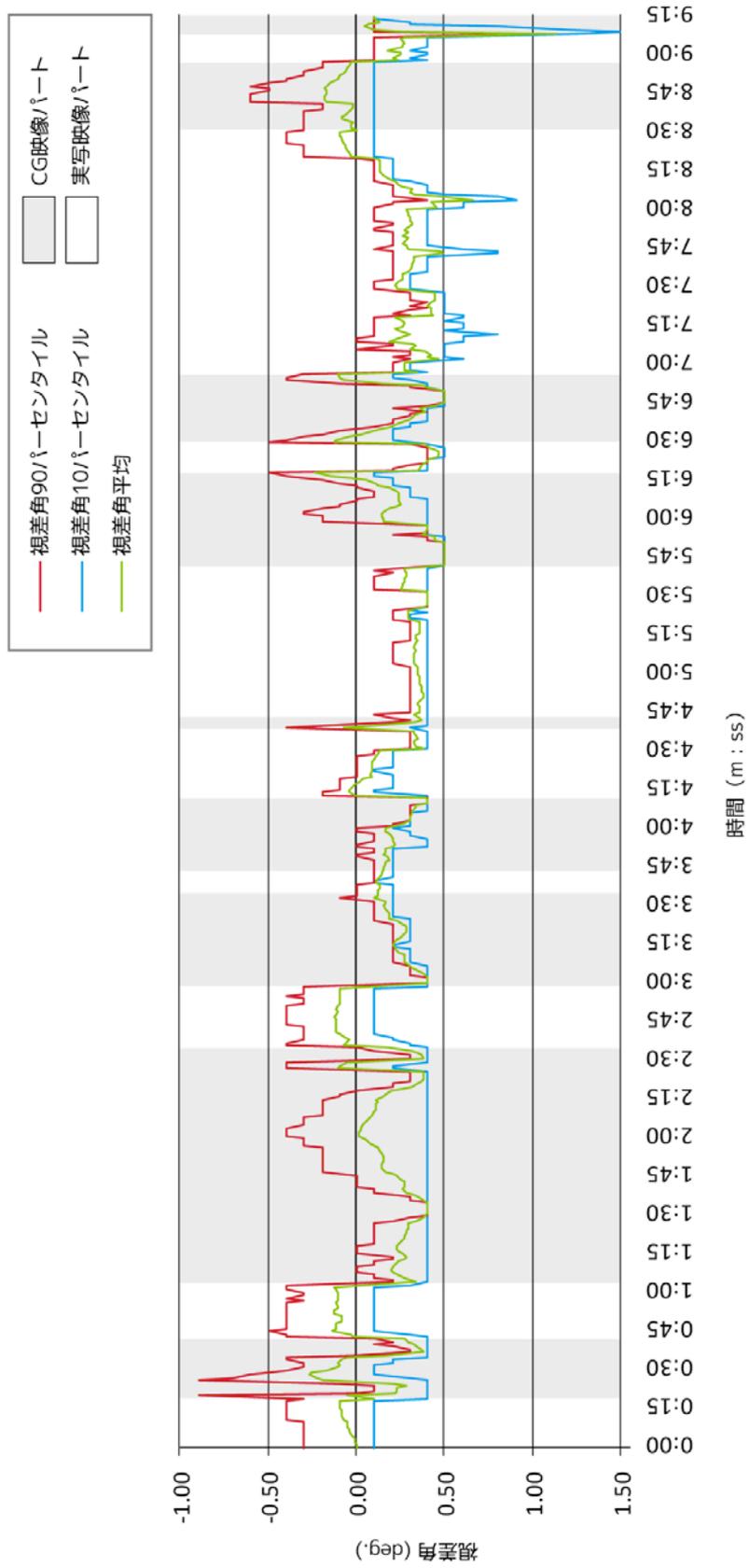
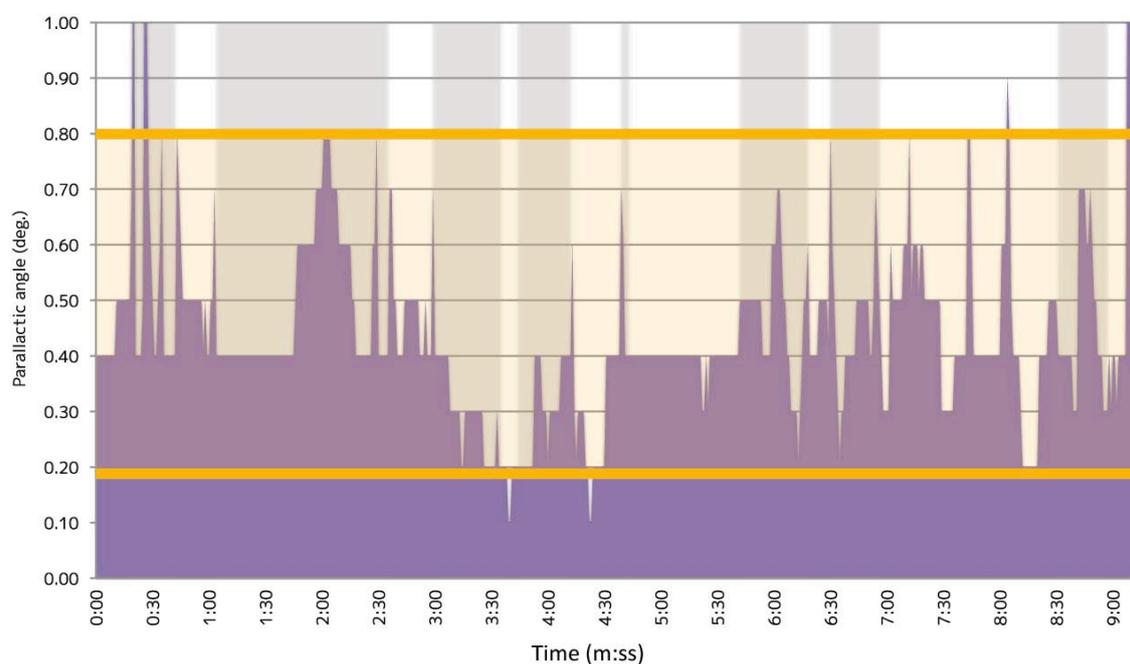
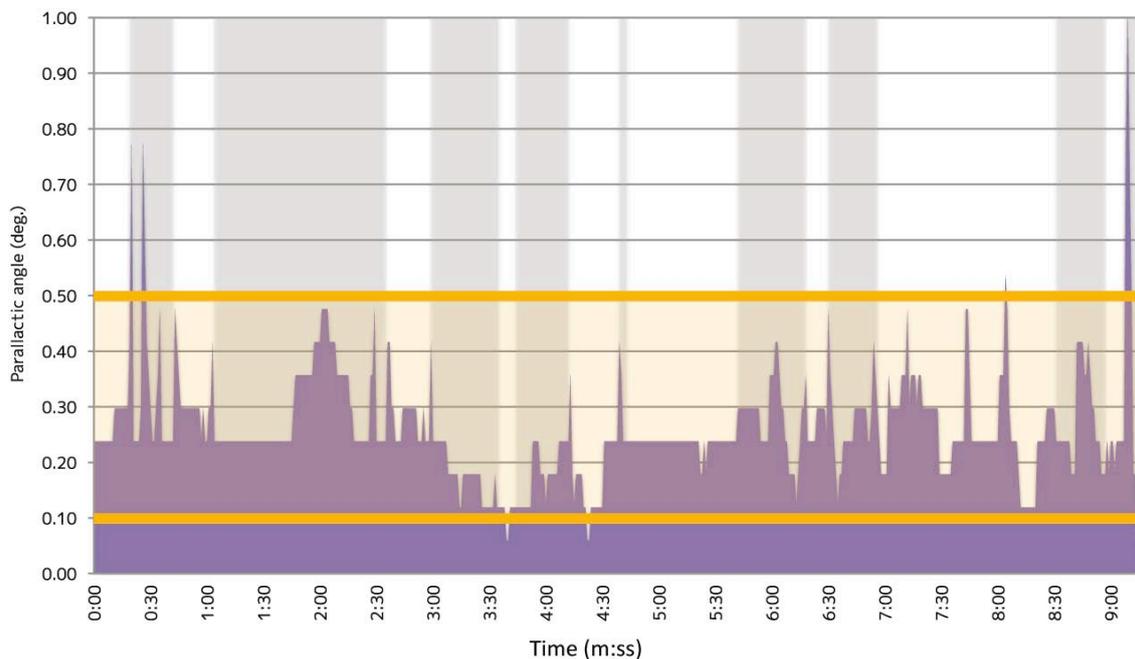


図5.9 コンテンツ中の視差角変化

また、視聴位置の違いによって、鑑賞者が3D映像コンテンツから受ける立体感の印象が最小限となるように、立体感の設計を行った。空間の厚みを表現する指標として、解析された視差角の90パーセンタイル値と10パーセンタイル値の差を用いた。大半のカットの視差角が、最前列では0.2から0.8度の間に、最後列では0.1から0.5度の間に、収まるように設計した(図5.10)。最前列に視差角の範囲に対して、最後列ではおよそ60パーセントほど狭まった範囲に収まっている。



a. 最前列の視差角（オレンジの範囲は、視差角 0.2 から 0.8）



b. 最後列の視差角（オレンジの範囲は、視差角 0.1 から 0.5）

図5.10 最前列と立見での視差角

5. 6 3D コンテンツの主観評価

5. 6. 1 方法

3D シアターナチュラルの来場者に対して、主観評価を行った。当該コンテンツを鑑賞した後、質問項目の書かれたアンケート用紙を配布し、その場で記入してもらった。アンケートでは、性別、年代、座席位置、3D 鑑賞経験に関する属性と、評定尺度法による3Dコンテンツの奥行き感、自然さ、眼の疲労感に関する質問を用意した。3D コンテンツの奥行き感と自然さは5件法、眼の疲労感は4件法で回答を求めた。鑑賞時の座席位置は、前列、中列、後列、立見と前後方向に4分割し、スクリーンに向かって右側、中央、左側の3分割を加えた、計12ブロックに分割し記録した。分割した座席位置毎の視距離と視野角の関係を図5.11に示す。

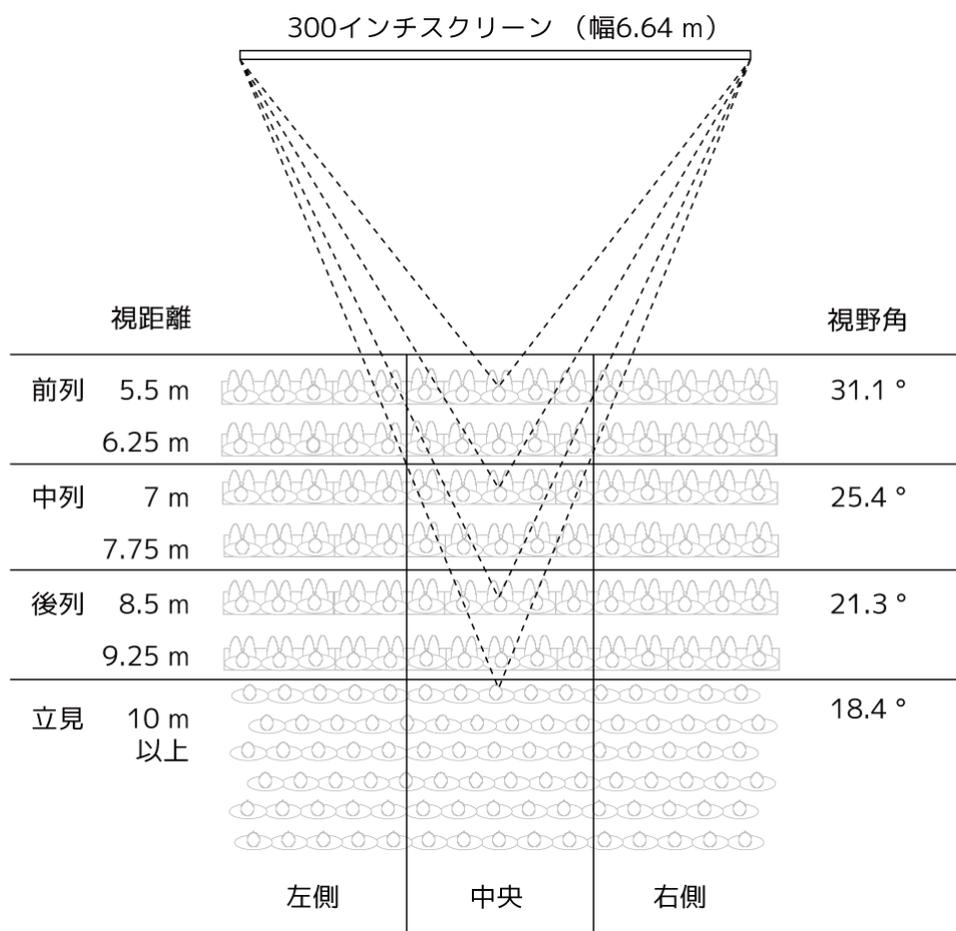


図5.11 座席位置と視野角

5. 6. 2 結果

アンケート回答者数と座席位置の関係を表 5.1 に示す。有効回答数は、447(男性 166 名、女性 281 名)であった。

表5.1 アンケート回答者の座席位置 (n=人)

	左側	中央	右側	計
前列	25	67	19	111
中列	26	72	46	144
後列	35	96	40	171
立見	4	14	3	21
計	90	249	108	447

実写素材とCG素材の奥行き感、自然さに関する結果を、図 5.12 に示す。奥行き感の平均評点は実写が 3.5、CG が 3.62 と CG の方が高く評価された。自然さの平均評点は、実写が 4.04、CG が 3.95 と実写の方が高く評価された。それぞれの項目に対して、t 検定を行った結果、奥行き感 ($t(446)=2.23, p<.05$)、自然さ ($t(446)=-5.12, p<.01$) とともに、有意差が認められた。

目の疲労感の評価結果を図 5.13 に示す。6 割以上である 279 名の鑑賞者が疲れなかったと評価しており、平均評定点は 2.23 であった。

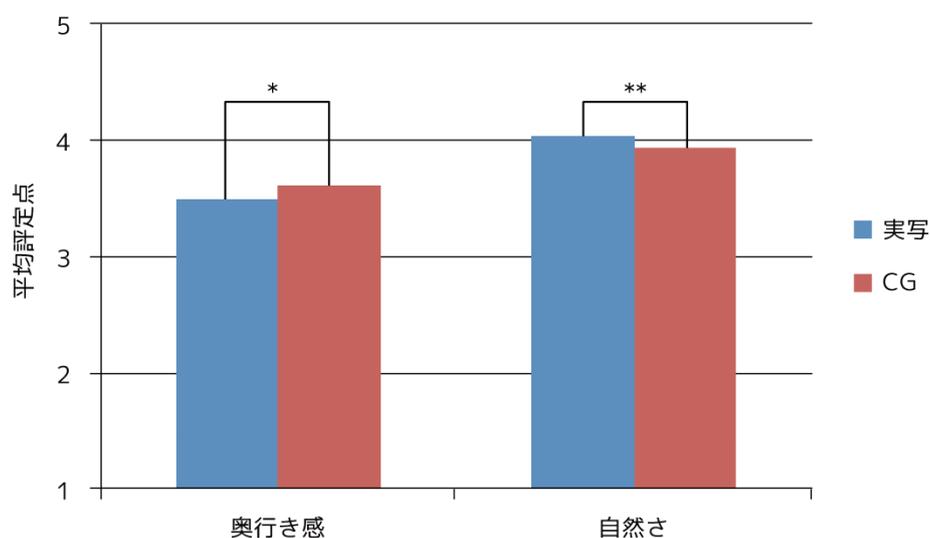


図5.12 奥行き感と自然さの評価結果 (** $p < 0.01$, * $p < 0.05$)

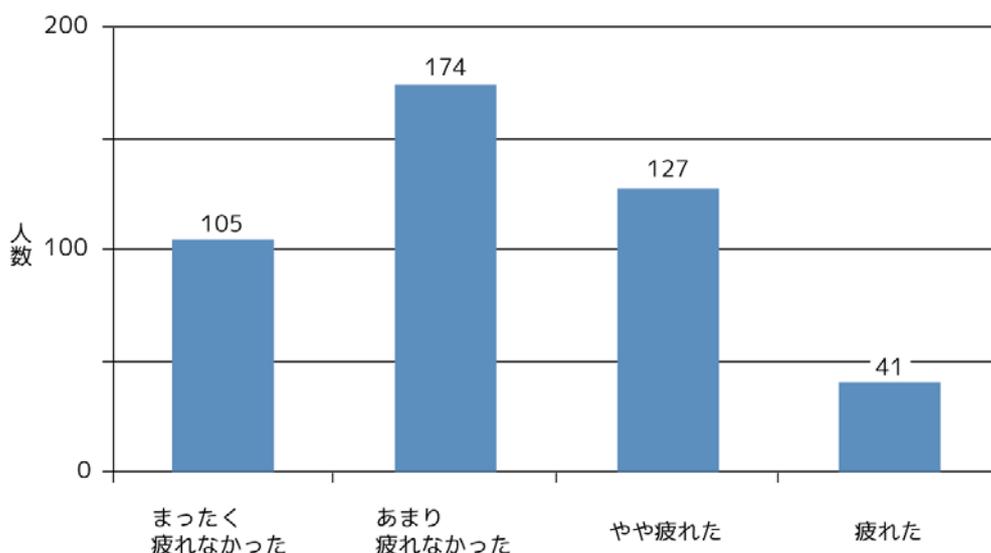


図5.13 目の疲労度についての集計結果

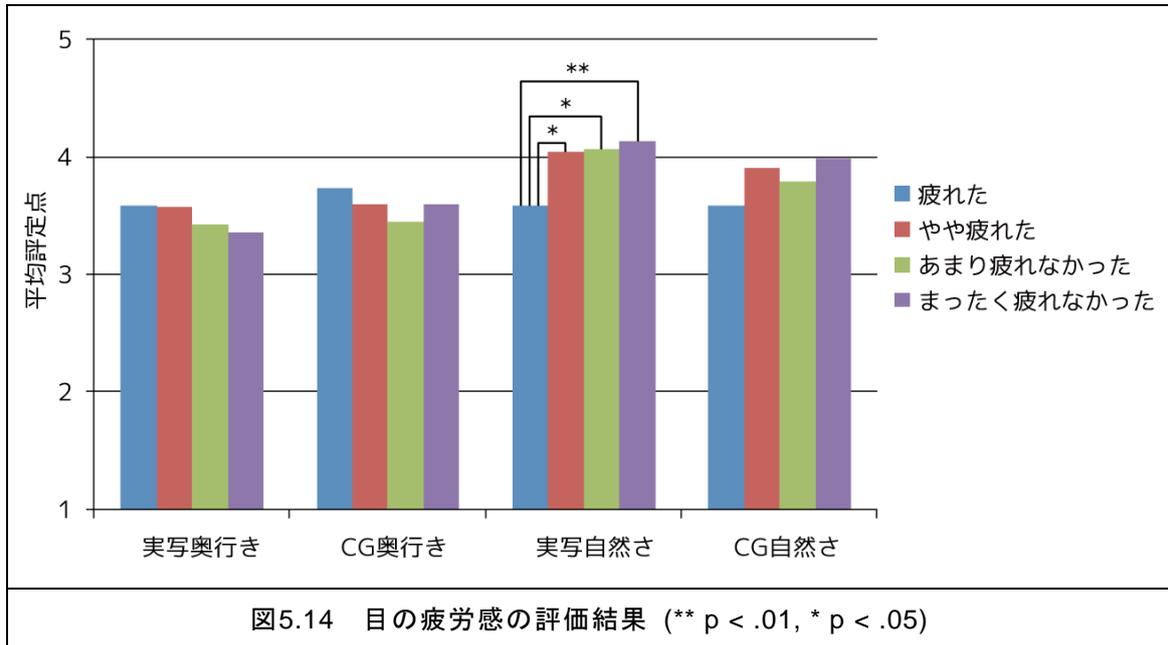


図5.14 目の疲労感の評価結果 (** p < .01, * p < .05)

眼の疲労感が及ぼす奥行き感と自然さへの影響を検討するため、疲労度と実写の立体映像の奥行き感、実写の立体映像の自然さ、CGの立体映像の奥行き感、CGの立体映像の自然さについて、分散分析を行った。その結果、実写の立体映像の自然さに有意差が見られた($F(3,443)=4.05, p<.01$)。また、CGの立体映像の自然さには、有意差傾向が見られた($F(3,443)=2.20, p<.1$)。この結果を受けて、Scheffeの多重比較検定を行った結果、実写において、「疲れた」と回答した人よりも、「やや疲れた」($p<.05$)、「あまり疲れなかった」($p<.05$)、「全く疲れなかった」($p<.01$)と回答した人の方が、自然さを高く評価する傾向が認められた(図5.14)。CGの立体映像の自然さにおいては、有意差が見られなかったこの傾向は、CGではみられなかったことから、2D/3D変換の自然さが、疲労感と関連する可能性を示唆している。

また、座席位置毎の3D映像の鑑賞体験についての結果を図5.15に示す。座席位置の違いによる鑑賞体験への影響を確認するため、座席位置と実写の立体映像の奥行き感、実写の立体映像の自然さ、CGの立体映像の奥行き感、CGの立体映像の自然さについて、分散分析を行った。このとき、立見の条件は回答者数が少なかったため除外した。その結果、座席位置による影響について、有意差はみられなかった。

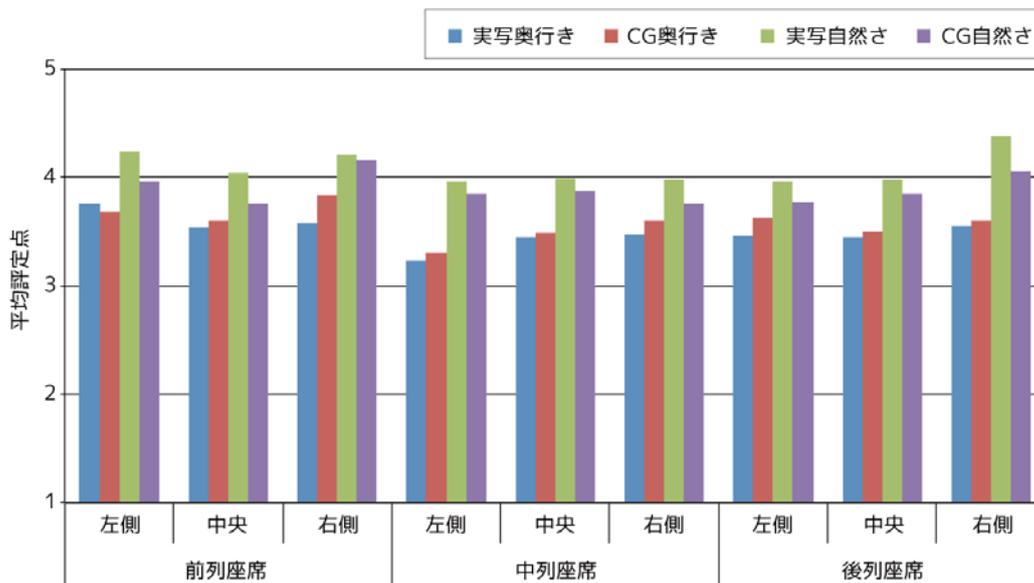


図5.15 座席位置毎の鑑賞体験の評価結果

5. 6. 3 考察

制作した 3D コンテンツの奥行き感と自然さについて、来場者アンケートによる主観評価を行った。実写映像、CG 映像とも観覧者からは、立体感において一定の評価を得られた。奥行き感については CG 映像の方が高く評価され、自然さについては実写映像の方が高く評価され、各条件間において有意差が認められた。同じ基準の視差角で制作されていても、3D 化の手法による印象の差について一定の傾向が認められたといえる。しかしながら、それぞれの平均評定点は僅差であった。このことから、既存の実写映像と CG 映像という異なる素材を 3D 化し新しい 3D コンテンツを制作するために、視差角によって異なる素材間の両眼視差を制御し統制することで、統一感のあるコンテンツ制作が可能であることが示唆された。

また、座席位置による影響について、有意差は見られなかった。このことから、今回制作・評価を行った 3D コンテンツの視差角と上映条件では、座席位置による立体感や自然さへの影響はないことが示唆された。このことは、文化遺産を 3D 映像表現する上で問題となる視聴位置による立体感への印象の変化が、本章で制作した 3D コンテンツではみられなかったといえる。

目の疲労感が及ぼす奥行き感と自然さへの影響については、2D/3D 変換による実写

映像の条件のみで、「やや疲れた」、「あまり疲れなかった」、「全く疲れなかった」と回答した人よりも、「疲れた」と回答した人が、自然さを低く評価する傾向がみられた。先に述べたとおり、2D/3D 変換では単眼立体情報との間に矛盾を生じやすいという問題がある。このことから、2D/3D 変換で 3D 化された映像では、個人差はあるが単眼立体情報との矛盾が自然さへの評価の低下につながり、さらに疲労感に関連すると推測できる。

さらに、制作した 3D コンテンツの視差角は、ガイドラインに準拠して範囲内に収めて制作を行っていることもあり、映像鑑賞中に体調不良を訴える観覧者はいなかった。

5. 7 まとめ

本章では、実写映像と CG 映像という異なる素材をそれぞれ 3D 化し、視差角という尺度を用いて統制された大型シアター向け 3D 映像コンテンツを制作した。制作したコンテンツを博物館で開催された展覧会のシアターで上映を行い、アンケートによる主観評価を行った。

- ・ 視差角分析を用いて、実写素材と CG 素材の両眼視差を設計・制御した結果として、奥行き感や自然さが積極的に評価されたと考えられる。
- ・ 実写素材の 2D/3D 変換と、CG 素材のステレオレンダリングという、3D 化の手法による印象の差は、奥行き感および自然さにおいて、ほとんどみられなかった。
- ・ 2D/3D 変換による 3D 映像の自然さと、眼の疲労感の関連について、疲労感を自覚しているものほど、自然さに対する印象が低くなるという傾向が認められた。
- ・ 座席位置による影響は、本章で制作した 3D コンテンツの評価結果ではみられなかった。

5. 8 参考文献

- 1) 原島博監修: 3次元画像と人間の科学; オーム社 (2000)
- 2) 山之上裕一, 永山克, 尾藤峯夫, 棚田詢, 元木紀雄, 三橋哲雄, 羽鳥光俊: 立体ハイビジョン撮像における左右画像間の幾何学的ひずみの検知限・許容限の検討, 電子

- 情報通信学会論文誌 D-II, J80-D-2(9), pp.2522-2531, 1997
- 3) 山之上裕一, 永山克, 尾藤峯夫, 棚田詢: 立体ハイビジョンにおける無ひずみ撮像・観察条件, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.3, pp.377-383, 1998
 - 4) Bernard Mendiburu: 3D Movie Making: Stereoscopic Digital Cinema from Script to Screen, Focal Press, (2009).
 - 5) K. N. Ogle : An analytical treatment of the longitudinal horopter, its measurement and application to related phenomena, especially to the relative size and shape of the ocular images. Journal of the Optical Society of America 22, pp.665-728 (1932).
 - 6) P. L. Panum : Physiologische untersuchungen über das sehen mit zwei augen. Schwerssche Buchhandlung (1858)
 - 7) 矢野澄男 他 : 両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因 映像情報メディア学会誌 57, No.9, pp.1187-1193 (2003).
 - 8) D. A. Hoffman : Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. Journal of Vision 8, No.3, pp.1- 30 (2008).
 - 9) 江本正喜, 矢野澄男: “立体画像観視における両眼の輻湊と焦点調節の不一致と視覚疲労の関係”, 映像情報メディア学会誌, 56(3), pp. 447-454 (2002)
 - 10) 井上哲理, 野呂影勇, 岩崎常人, 大頭仁: “視覚機能から見た立体映像の呈示条件”, テレビジョン学会誌, 48(10), pp. 1301-1305 (1994)
 - 11) 花里 敦夫 , 山之上 裕一 , 野尻 裕司 , 岡野 文男: 2 眼立体画像における視差の不連続な時間変化による見づらさの評価, 映像情報メディア学会技術報告 27(23), pp.37-40, (2003)
 - 12) Woods,T. Docherty,R. Koch:Image distortions in stereoscopic video systems,SPIE,Vol.1915,pp.36-48(1993)
 - 13) 河合隆史, 盛川浩志, 太田啓路, 阿部信明: 3D 立体映像表現の基礎, オーム社, (2010)
 - 14) The Illustrated 3D Movie List: <http://www.3dmovielist.com/list.html>
 - 15) 特別展 インカ帝国のルーツ 黄金の都シカン:
<http://www.kahaku.go.jp/exhibitions/ueno/special/2009/sican/index.html>
 - 16) オートデスク社 Autodesk Softimage :<http://www.autodesk.co.jp/softimage>
 - 17) 岸信介, 山添崇, 柴田隆史, 河合隆史, 井上哲理, 坂口裕介, 岡部和重, 久野泰浩:

“2 眼式立体映像のコンテンツ評価システムの試作”, 映像情報メディア学会誌, 60(6), pp. 934-942 (2006)

第6章 結論

本研究では、文化遺産を3次元デジタルアーカイブされたデータの利活用の推進を目的として、様々な手法で文化遺産を3D映像表現することを試みた。

第1章では、本研究の背景とデジタルアーカイブ技術と3D映像表示技術の現状について述べ、本研究の目的について示した。

第2章では、文化遺産の3次元デジタルアーカイブの取り組みについて利活用に関する先行研究について述べ、その中で3Dディスプレイを利用したものについても述べた。さらに3D映像については、2D映像とは異なる課題が知られているため、その原理について解説し、文化遺産を3D映像表現によって公開する際の課題点を抽出し、当該分野における本研究の位置づけを明らかにした。

第3章では、文化遺産の新たな3D映像表現という切り口から、インタラクティブ性を有した水平表示型3Dディスプレイシステムを試作した。試作したシステムでは、3D映像の水平表示を行うことで高さを表現すると同時に、多様なインタラクションを実装しており、ユーザーテストの結果から、立体感や質感について良好な評価が得られた。このことから、3D映像表現が、形状や大きさといった、文化遺産にとって重要な情報の理解に効果的であることが示唆された。

また、画像呈示面を傾斜させるという操作については、直感的で分かりやすいと評価されたことから、立体映像を操作するための、一般的なインタフェースとしての可能性がある。指先のセンシングと対象の融像位置の調整によるクロスモーダル刺激によって、物体表面を撫でるというインタラクションにおいても、形状の把握に有効であるとされた。しかしながら、意図したような「触れる」感覚という点では、感覚の強度不足していることがわかり、3D映像を用いたクロスモーダル刺激による視触覚の統合やインタラクションに、多くの課題や改善点があると考えられた。その他、立体像と指の交差による奥行き情報の矛盾や、画像呈示面の傾斜による左右像の分離の低下といった、立体映像を用いたインタラクティブなシステムにおける特徴的な問題点も指摘された。

試作したシステムは、17インチの3Dディスプレイを使用している。3D映像の表現とし

では、高さを示し、実際に指や手の動きを使ったインタラクションを実装している。第3章で得られた知見は、手元で鑑賞するための映像であり、4インチから24インチ程のモバイルからデスクトップサイズまでディスプレイで呈示される3D映像の鑑賞に、適用できるものであると考える。

第4章では、中国麦積山石窟の3次元デジタルアーカイビングとVRコンテンツの制作を行った。制作したVRコンテンツでは、麦積山石窟第123窟を中心に3D映像による表現を取り入れ、インタラクティブな操作によって仮想体験するシステムを構築した。また、3次元デジタルアーカイブしたデータを用いて、3D映像表現したことで、実写では難しい大きな対象の鳥瞰の視点や歪みの少ないズーム効果を実現した。

アンケートによるコンテンツの評価を行い、違和感の少なさや実物らしさについて高い評価が得られ、コンテンツの再現性に対する高い信頼が確認された。また、立体感、臨場感、スケール感についても高い評価が得られたことで、文化遺産の形状や雰囲気表現することの有効性が示唆された。一方で、ごく少数ではあるが、目の疲れや酔いを報告する鑑賞者もあり、カメラワークなどの演出や鑑賞位置の指示について、さらなる配慮が必要であることが示唆された。

また、本研究で実践したVRコンテンツを利用しての高精細な3D映像の生成は、カメラパラメーターの試行錯誤の回数が多くなりがちな3D映像コンテンツ制作時において、リアルタイムに立体感の確認ができ、3DCGアプリケーションを使用して制作するよりも大幅に制作時間が短縮できた。これによって、容易に呈示環境に合わせたスケーラブルなコンテンツの出力が可能である。よって、多様な呈示環境へ対応した3D映像を制作する際の、利便性の高い方法を提案することができた。

試作したVRコンテンツは、ホームシアターなどで比較的少数での鑑賞を想定して、3D映像表現を行い、評価を行っている。第4章で得られた知見は、40インチから120インチ程の一般的なホームシアターサイズのディスプレイで呈示される3D映像の鑑賞に、適用できるものであると考える。

第5章では、実写映像とCG映像という異なる素材をそれぞれ3D化し、視差角という尺度を用いて統制された大型シアター向け3D映像コンテンツを制作した。制作したコンテンツを博物館で開催された展覧会のシアターで上映を行い、アンケートによる主観評価

を行った。視差角分析を用いて、実写素材と CG 素材の両眼立体情報を設計・制御した結果として、奥行き感や自然さが積極的に評価されたと考えられた。実写素材の 2D/3D 変換と、CG 素材のステレオレンダリングという、3D 化の手法による印象の差についても、奥行き感および自然さに認められたが、平均評定点ではごく僅差に抑えることができた。また、2D/3D 変換の自然さと疲労感の関連についても、一定の傾向があることが示唆された。座席位置による立体感への影響を考慮して視差角の範囲を設定して制作したため、300 インチスクリーンでの上映条件では、座席位置による影響は、評価結果からはみられなかった。

制作した 3D 映像コンテンツは、シアターなどの大きなスクリーンで大人数での鑑賞を想定して、視差角による制御を行い、座席位置や映像の印象についての評価を行っている。第 5 章で得られた知見は、300 インチ以上のシアターサイズにプロジェクションされた 3D 映像の鑑賞に、適用できるものであると考える。

本研究を通して、以下の知見が得られた。

- 小型の文化遺産について、手元に 3D 映像を浮かび上がらせ操作させることで、対象の高さを表現でき、より強く形状を意識させるのに有効性が示された。
- 視覚と触覚を併せて用いることで、文化遺産へ「触れる」という新しい映像表現への可能性が示された。
- 自然視では形状把握が不可能な大型の文化遺産においても、立体感を正しく伝えることで、形状の把握に有効であることが示された。
- 実写と CG など質的に異なる素材においても、立体視という次元で値を統一することによって、違和感の少ない 3D 映像コンテンツの制作が可能であることが示された。
- 一定の視差角の範囲内に収まった 3D 映像であれば、視聴位置の違いに起因する形状の歪みは、異なった印象を感じさせないことが示された。

これらの成果によって、3次元デジタルアーカイブされた文化遺産について、従来の2D映像ではなく、3D映像を用いて表現することで、文化遺産を効率的かつ効果的に公開し伝達する方法としての有効性を示した。また、多様な文化遺産のタイプに対して、システムを試作を行い実証的に公開方法を示した。本研究で得られた知見は、文化遺産デジタルアーカイブの利活用と3D映像コンテンツの表現について更なる発展、高度化に寄与できる考える。

しかしながら、第2章と第3章で試作したシステム閲覧システムは、実用化されておらず、実用化に向けたシステムの効率化が、今後の課題である。また、コンテンツを呈示するデバイスの対象範囲を広げ、近年一般化しているモバイル用の小型3Dディスプレイや裸眼式の3Dディスプレイを利用した、文化遺産を効率的に公開するための3D映像表現に関する検討を引き続き行っていく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、魅力あるテーマを与えて下さり、親切かつ熱心なご指導をいただいた早稲田大学理工学術院の河合隆史教授に心から感謝の意を表します。

本論文の作成にあたり、貴重なご意見とご指導頂きました早稲田大学大学院国際情報通信研究科の安藤紘平教授、浦野義頼教授、大谷淳教授に感謝致します。

デジタルアーカイブ分野での研究を始めるきっかけを作っていた、早稲田大学文学学術院の大橋一章教授、櫻庭裕介先生、肥田路美教授に感謝致します。

本研究で対象とした 3D 映像コンテンツを制作するにあたり、多大なご協力をいただいた北京大学情報科学センター査紅彬教授、凸版印刷株式会社の小川恵司様、斉藤友明様、安藤真様、株式会社 TBS テレビの工藤尚美様、藤田和子様、柿沼司様に感謝致します。

本研究を進めるにあたり多大なご協力とご助言いただいた、早稲田大学理工学術院の三家礼子客員准教授、盛川浩志助教、河合研究室の豊沢聡さん、柴田隆史さんに感謝致します。また、日頃より同じ研究室で学び、協力し合ってきた河合研究室の金相賢さん、李在麟さん、岸信介さん、池下花恵さん、加藤亮さん、山添崇さん、尹夏英さん、栗原俊介くん、佐古めぐみさんに感謝致します。

最後になりましたが、本論文を作成するために深くご理解いただき、仕事面やプライベート面でサポートしていただいた、株式会社クオリティ エクスペリエンス デザインの太田啓路さん、伊藤朝香さん、そして社員の皆さまに深く感謝致します。

2012 年 7 月

阿部 信明

研究業績

<学会論文>

1. Nobuaki Abe, Keiji Ohta, Takashi Kawai, Tsukasa Kakinuma, Kazuko Fujita, Naoko Kudo, "Ergonomic evaluation of stereoscopic content for a museum exhibition", *Journal of Information Display*, Volume 12, Issue 3, pp. 159-165, August 2011 ○第5章の内容に相当
2. Hayoung Yoon, Nobuaki Abe, Keiji Ohta, Takashi Kawai, Shinichiro Suzuki, "Subjective Evaluation of Wide-Viewing-Angle Stereoscopic Contents in a Dome Theater", *Journal of Information Display*, Volume 12, Issue 3, pp. 153-158, August 2011
3. 尹夏英, 阿部信明, 河合隆史, 井上哲理, エルハム・アンダローディ, モハメド・レザ・マティーニ, 小野欽司, "バーチャル遺産における人物配置と印象の変化", *日本バーチャルリアリティ学会誌*, Vol.15, No.2, pp.203-212, 2010年6月
4. 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ビングと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年9月 ○第4章の内容に相当
5. 小野欽司, Elham ANDAROODI, Alireza EINIFAR, 阿部信明, M. Reza MATINI, Olivier BOUET, Frank CHOPIN, 河合隆史, 北本朝展, 伊藤朝香, Eskandar MOKHTARI, Saeed EINIFAR, Mohammad Seyyed BEHESHTI, Chahryar ADLE, "世界危機遺産バム城塞の3次元CG復元とバーチャルリアリティ", *Progress in informatics : PI* 5, pp.99-136, 2008年3月

<著作(分担執筆)>

1. "3D立体映像表現の基礎", オーム社, 2010年9月
2. "立体映像技術 ー空間表現メディアの最新動向ー", シーエムシー出版, 2008年7月

<国際会議>

1. Shinsuke Kishi, Nobuaki Abe, Takashi Shibata, Takashi Kawai, Makoto Maeda, Kouichi Hoshi, "Stereoscopic camera system with creator-friendly functions", *Proceedings of SPIE 7237 Stereoscopic Displays and Applications XX*, pp. 1M-1 - 1M-9, January 2009

2. M. R. Matini, E. Andaroodi, H.Y. Yoon, N. Abe, A. Kitamoto, T. Kawai, K. Ono, "Virtual 3DCG of the Citadel of Bam", Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology 2009 Demo paper, CD-ROM, January 2009
3. Nobuaki Abe, Takashi Kawai, Mami Kawaguchi, Makoto Ando, "Interactive Stereoscopic Viewer for Cultural Heritage", Proceedings of SPIE 6803 Stereoscopic Displays and Applications XIX, pp. 14-1 - 14-9, January 2008 ○第3章の内容に相当
4. E. Andaroodi, M. Matini, N. Abe, K. Ono, and T. Kawai, "3-D Reconstitution and Virtual Reality of World Heritage Site in Danger: the Citadel of Bam", short paper and proceedings of Virtual Environments 2007, 13th Eurographics Symposium on Virtual Environments, pp. 43-44, Germany, July 2007

<学会発表>

1. 古鎮宇, 大谷淳, 阿部信明, 河合隆史, “3次元実写画像の彩度を考慮した立体感強調法に関する検討”, 2011年電子情報通信学会総合大会, 情報・システム講演論文集 2, D-11-48, p.48, 2011年3月
2. 古鎮宇, 大谷淳, 阿部信明, 河合隆史, “3次元実写画像の立体感強調法に関する検討～彩度と明度を考慮した手法の組み合わせの比較検討～”, 電子情報通信学会技術報告, vol. 110, no. 467, PRMU2 010-291, pp. 317-322, 2011年3月
3. 尹夏英, 阿部信明, 太田啓路, 河合隆史, 鈴木真一郎, ”ドームシアターにおける広視野立体視コンテンツの主観評価”, 日本人間工学会関東支部第40回大会講演集, pp. 168-169, 2010年12月
4. 阿部信明, 太田啓路, 河合隆史, 安藤紘平, 柿沼司, 藤田和子, 工藤尚美, ”2D/3D変換を用いた博物館向け立体視コンテンツの主観評価”, 日本人間工学会関東支部第40回大会講演集, pp. 170-171, 2010年12月
5. Xiao Ding, Jun Ohya, Takashi Kawai, Nobuaki Abe, "3D Sensation Enhancement of 3D Digitized Models for 2D displays Using Local Gray-level Contrast and Range Information", The 3rd Korea-Japan Joint Workshop on Pattern Recognition, November 2008

6. Xiao Ding, Jun Ohya, Takashi Kawai, Nobuaki Abe, "Study of Optimizing the Parameters in the Weighted Histogram Equalization for Stereoscopic Enhancement", 第7回情報科学技術フォーラム (FIT2008), 第3分冊, pp. 123-124, 2008年9月
7. Xiao Ding Jun Ohya Takashi Kawai Nobuaki Abe, "Study of Stereoscopic Contrast Enhancement Based on Local Contrast and Distance Information", 電子情報通信学会技術報告, vol. 108, no. 127, IE2008-41, pp. 49-54, 2008年7月
8. Xiao Ding Jun Ohya Takashi Kawai Nobuaki Abe, "Study of 3D Contrast Enhancement Based on Weighted Histogram Equalization", 2008年電子情報通信学会総合大会, D-12-62, 情報・システム講演論文集2, p.193, 2008年3月
9. Xiao Ding, Jun Ohya, Takashi Kawai and Nobuaki Abe, "Image Contrast Enhancement Based on Distance Information", 電子情報通信学会技術報告, Vol. 107, No. 539, PRMU2007-287, pp. 267-270, 2008年3月
10. Elham ANDAROODI, M. Reza MATINI, Nobuaki ABE, Kinji ONO, Asanobu KITAMOTO, Takashi KAWAI, Eskandar Mokhtari, "Simultaneous Implementation of Heterogeneous Data for 3-D Reconstitution of the UNESCO World Heritage in Danger: Arg-e-Bam", 人文科学とコンピュータシンポジウム じんもんこん 2007, pp. 265-270, 2007年12月
11. 阿部信明, 河合隆史, 川口真実, 安藤真, "立体視を用いた文化財インタラクティブビューアの開発", 日本バーチャルリアリティ学会第12回大会論文抄録集, pp. 87-88, 2007年9月
12. 阿部信明, 河合隆史, 川口真実, 安藤真, "文化財のインタラクティブ立体視ビューアの開発", SCCC 研報, Vol.2007, No1, C2007-1-6, pp.13-14, 2007年3月
13. 阿部信明, 河合隆史, 伊藤朝香, 池田踐理, Elham Andaroodi, 小野欽司, "3次元CGによるイラン・バム遺跡の仮想復元", 情報処理学会第68回全国大会論文集(4), pp.9-10, 2006年3月

<解説>

1. 太田啓路, 阿部信明, "2D/3D 変換の基礎", ビデオα 10月号, Vol.26, No.10, pp. 88-92, 2010年9月
2. 河合隆史, 阿部信明, "文化遺産 VR コンテンツの立体視表現", 光技術コンタクト, 第46巻, 第8号, pp. 17-21, 2008年8月
3. 阿部信明, 河合隆史, 川口真実, 安藤真, "文化遺産インタラクティブ立体視ビューア", 画像ラボ, Vol.19, No.6, pp. 21-25, 2008年6月

<特許出願>

1. 河合隆史, 盛川浩志, 太田啓路, 阿部信明, "立体映像制作装置およびプログラム", 出願 2010-021680 (2010/02/02) 公開 2011-160302 (2011/08/18), 出願人: 学校法人早稲田大学
2. 新改博久, 河合隆史, 阿部信明, "立体視用印刷物", 出願 2008-029708 (2008/02/08) 公開 2009-186938 (2009/08/20), 出願人: 凸版印刷株式会社, 学校法人早稲田大学
3. 河合隆史, 阿部信明, 阿川弘己, 太田啓路, 白鳥重昭, "立体画像生成装置およびプログラム", 出願 2007-224934 (2007/08/30) 公開 2009-059113 (2009/03/19), 出願人: 学校法人早稲田大学, 株式会社トイボックス, 株式会社新産業文化創出研究所, 株式会社ワンダースピリッツ