

修士論文

2010 年度

空間型 AR 技術を用いた
デジタルミュージアムに関する研究

資延 香里

(学籍番号 : 80933241)

指導教員 小木 哲朗

2011 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
システムデザイン・マネジメント専攻

論 文 要 旨

学籍番号	80933241	氏 名	資延 香里
論文題目： 空間型 AR 技術を用いたデジタルミュージアムに関する研究			
<p>(内容の要旨)</p> <p>近年、博物館の来館者ニーズが多様化している。この背景として、人々のライフスタイルの変化がある。今後、どのように彼らのニーズに対応していくのかが、博物館の抱える共通課題であると言える。そこで本研究では、デジタルミュージアムの実現を目指し、雰囲気伝える空間型 AR 展示システムを提案する。従来の博物館では「モノ」の展示が一般的で、当時の雰囲気を伝える試みは多くなかった。本提案は、展示物とともにその周囲の雰囲気を表現することで鑑賞者のより深い理解を実現したり、新たな興味や関心を持つきっかけを提供したりすることで、多様なニーズに対応することを目的としたものである。展示技術として、時空間の離れた情報を融合して展示を行うため、空間型 AR 展示技術を用いる。本研究では、大画面ハーフミラーディスプレイを組み込んだ AR シアターによる展示を想定し、CG 映像によって表現された仮想世界と現実世界を融合する。雰囲気表現のためには、仮想世界と現実世界のシーンを切り替えたり融合したりすることによって、鑑賞者を仮想世界に没入させる必要がある。したがって、現実世界を部分的に CG 映像で隠すという機能が求められる。しかし、この展示システムにおける AR シーンの見え方は非常に不安定であるため、博物館展示へ応用するために「シーンの見え方」を評価する。そして、効果的なコンテンツ制作ができるような指標を導き出す必要がある。</p> <p>本研究では、まず色の効果に着目し、展示物と CG 映像の色がシーンの見え方に与える影響と、効果的に展示物を隠すことができる色の組み合わせを明らかにするために、心理物理実験を行った。しかし、色合成効果には限界があるため、別のアプローチとして、アニメーションによる視点誘導効果についても検証を行った。最終的に、実験から明らかになった指標を反映して展示コンテンツを制作し、デモ展示によるシステム評価を行った。</p> <p>実験の結果、展示物の明度と映像光の明るさの関係がシーンの見え方に影響を与えることが示された。特に展示物と映像の色々の明度差が小さい場合、補色関係にある色の組み合わせによって効果的に展示物を隠せることが示唆された。また、視点誘導の効果を利用することで展示物への注意が逸れ、そのことが結果的にシーンの見え方の向上につながることを示唆された。また、デモ展示のアンケートの結果から、この展示システムの有効性、および本提案の妥当性を示すことができた。</p>			
キーワード (5 語) デジタルミュージアム、展示、空間型 AR 技術、雰囲気、AR シーン			

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	80933241	Name	Kaori SUKENOBE
Title			
The Study of Digital Museum Using Spatial Augmented Reality Technology			
Abstract			
<p>Recently, the number of museum has increased. However, the number of visitors for each museum has decreased. One of the reasons of this is thought to be that the requirement of people has become diversified. Therefore, the new exhibition style and method, which can satisfy their requirements, are important for the museum.</p> <p>In this paper, we proposed the exhibition system using the spatial augmented reality technology for the digital museum. The current museum usually exhibits the object. In this exhibition style, visitors have to read the explanatory note to understand what is this. In order to understand the exhibition, the information around object is very important. In other words, it is the atmosphere. For example, the bustle of town, the lifestyle of people and the situation of the excavation site. Our exhibition system can represent the atmosphere with the object by integrating the full-scale computer graphics images and the real object using a spatial augmented reality technology. Therefore viewers can feel immersive sensation into the artificial augmented reality world, and they can understand the exhibition easily. However, for the practical use, this exhibition system has problem to be solved. When we want to represent the atmosphere, we have to change the scenes completely by hiding the real world with the virtual image. But that is sometimes impossible. Then, the aim of this study is verification of the user's view in this exhibition system for the effective contents creation.</p> <p>In this study, we conducted the experiments about the color overlapping. We expected that we could improve the user's view using the effect of the combination between the real object and the virtual image. But this effect has the limit. Then, we verified the effect of the controlling user's viewpoint. And, we created an example of the exhibition contents, and we exhibit in the museum for the test.</p> <p>As the result, we understood the effect of color overlapping had great influence on the user's view. And we could show the possibility to improve the user's view leading the user's viewpoint. Finally, we could show the validity of our system.</p>			
Key Word(5 words)			
Digital Museum, Exhibition, Spatial Augmented Reality Technology, Atmosphere and AR scene			

目次

第1章	緒論	1
1.1.	研究背景	1
1.1.1.	博物館の現状と課題	1
1.1.2.	国の取り組み	3
1.1.3.	AR技術の動向	4
1.2.	研究目的	5
1.2.1.	雰囲気伝える空間型AR展示システム	5
1.2.2.	実用化に向けての課題	6
第2章	関連研究	8
2.1.	空間型AR技術に関する研究	8
2.1.1.	Virtual Showcase	8
2.1.2.	dreamoc	9
2.1.3.	Shader Lamps	9
2.2.	博物館展示に関する研究	10
2.2.1.	デジタル展示ケース	10
2.2.2.	過去の様子を体験する展示システム	11
2.3.	実際の応用例	11
2.4.	色覚説	12
第3章	システムのコンセプト	14
3.1.	雰囲気とは	14
3.2.	システム要求	14
3.3.	システム要素	15
第4章	空間型AR展示システム	16
4.1.	ARVIEW	16
4.2.	システム構成	17
4.3.	オクルージョン表現手法	19
4.4.	実験装置の構築	20
4.4.1.	システム構成	20
4.4.2.	台形補正と投影サイズ	21
4.5.	展示コンテンツの利用	21
4.5.1.	3DCGソフトウェア	22
4.5.2.	REMO	22
4.5.4.	AR展示システムでの実装方法	23
第5章	色合成効果に関する実験	26
5.1.	展示物の色の明度に関する実験	26
5.1.1.	概要	26
5.1.2.	実験方法	26
5.1.3.	結果	30
5.1.4.	考察	35
5.2.	色の組み合わせに関する実験	38
5.2.1.	概要	38
5.2.2.	実験方法	38
5.2.3.	結果	39

5.2.4. 考察.....	42
第6章 アニメーションによる視点誘導効果に関する実験	44
6.1. アニメーション効果に関する実験	44
6.1.1. 概要.....	44
6.1.2. 実験方法.....	44
6.1.3. 結果.....	45
6.1.4. 考察.....	46
6.2. アニメーションの種類に関する実験	47
6.2.1. 概要.....	47
6.2.2. 実験方法.....	47
6.2.3. 結果.....	49
6.2.4. 考察.....	50
第6章 システム評価	51
6.1. デモ展示の目的	51
6.2. システム概要	51
6.2.1. 超指向性スピーカー.....	53
6.3. 展示コンテンツ	54
6.4. アンケート項目	56
6.5. アンケート結果	58
6.6. 考察.....	60
第7章 空間型 AR 展示システムの展望.....	62
第8章 結論	64
謝辞	65
参考文献	66
国内会議での発表	67
国際会議での発表	67

図目次

図 1-1 : 博物館数の推移	1
図 1-2 : 入館者数の推移	2
図 1-3 : 1館あたりの入館者数の推移	2
図 1-4 : セカイカメラ	5
図 1-5 : 飛び出す電子絵本 AR Book (大日本印刷)	5
図 1-6 : As is To be	6
図 1-7 : 不完全な表現の例	7
図 1-8 : 色の役割	7
図 2-1 : Virtual Showcase	8
図 2-2 : dreamoc	9
図 2-3 : Shader Lamps	9
図 2-4 : デジタル展示ケース	10
図 2-5 : The Sprit of Beauty	11
図 2-6 : 反対色説の色相環(a)と反対色成分による表現(b)	12
図 2-7 : 段階説	13
図 3-1 : システム要素	15
図 4-1 : ARView での展示の例	16
図 4-2 : DepthQ	17
図 4-3 : TDP-FF1A	17
図 4-4 : ARView の外観	18
図 4-5 : システム構成	18
図 4-6 : オクルージョン表現	19
図 4-7 : 実験装置のシステム構成	20
図 4-8 : 実験装置の外観	20
図 4-9 : 投影サイズ	21
図 4-10 : REMO によるデータの変換フロー	23
図 4-11 : AR 展示システムまでのデータの流れ	23
図 4-12 : AR 展示システムのソフトウェア構成	24
図 4-13 : 仮想映像だけを提示する場合	24
図 4-14 : 展示物だけを見せる場合	25
図 4-15 : 仮想世界と展示物を融合する場合	25
図 5-1 : 実物体設置位置	26
図 5-2 : カードの配置例	27
図 5-3 : トーン概念	28
図 5-4 : トーンの配置図	28
図 5-5 : 無彩色映像×カード	30
図 5-6 : 有彩色映像×カード	34
図 5-7 : 反射光の影響	36
図 5-8 : 調整後のシステム構成	37
図 5-9 : カラーカードの配置	38
図 5-10 : 赤のカード結果	39
図 5-11 : 黄のカード結果	39
図 5-12 : 緑のカード結果	40
図 5-13 : 青のカード結果	40
図 5-14 : 補色成分の吸収	43
図 5-15 : V トーンの各色相の明度差	43
図 6-1 : カードの配置例	44

図 6-2 : 静止画 (左) と動画 (右)	44
図 6-3 : アニメーション効果に関する実験結果	45
図 6-4 : 実物体の配置	47
図 6-5 : non-zoom	47
図 6-6 : zoom	48
図 6-7 : 評価基準の映像	48
図 6-8 : アニメーションの種類に関する実験結果	49
図 6-1 : 展示ブースでの配置	51
図 6-2 : 展示物とスクリーンの位置関係	52
図 6-3 : 展示物の外観	52
図 6-4 : 超指向性スピーカーによるスイートスポットへの誘導	53
図 6-5 : 展示コンテンツのシナリオ	56
図 6-6 : アンケート用紙	57
図 6-7 : 回答者の属性	58
図 6-8 : アンケート結果	58
図 6-9 : 展示システム	59
図 6-10 : デモ展示の様子	60
図 7-1 : 熊本城の様子	62
図 7-2 : 参勤交代の様子	62
図 7-3 : ガヤ音収録の様子	63
図 7-4 : ギャラリートークの例	63

表目次

表 1-1：博物館別入館者数の割合	3
表 3-1：システム要求	15
表 5-1：カードの明度値	27
表 5-2：無彩色の RGB 値	28
表 5-3：有彩色の RGB 値	29
表 5-4：評価基準	30
表 5-5：二元配置分散分析結果（無彩色映像）	30
表 5-6：カードを要因とする多重比較結果（無彩色映像）	31
表 5-7：カード 1 についての多重比較結果	31
表 5-8：カード 2 についての多重比較結果	32
表 5-9：二元配置分散分析結果（有彩色映像）	34
表 5-10：カードを要因とする多重比較（有彩色映像）	34
表 5-11：CG 映像の照度値	36
表 5-12：評価基準	38
表 5-13：赤のカード分散分析結果	39
表 5-14：黄のカード分散分析結果	39
表 5-15：緑のカード分散分析結果	40
表 5-16：青のカード分散分析結果	40
表 5-17：青のカードの多重比較結果	41
表 6-1：評価基準	45
表 6-2：三元配置分散分析結果	45
表 6-3：二元配置分散分析結果	49

第1章 緒論

1.1. 研究背景

1.1.1. 博物館の現状と課題

博物館は、有史以来の歴史、郷土文化の変遷の貴重な物的証拠などを展示する、教育・研究施設である。近年、その数は増加傾向にある。文部科学省が実施する社会教育調査（博物館調査）[1]によると、平成20年10月1日現在、国内の登録・相当施設、及び類似施設の数 は 5775 館に及ぶ。その中でも特に、類似施設の増加は著しく、平成20年には4527館となり、平成2年と比較すると、約20年の間で倍増していることが分かる。図1-1に博物館数の推移を示す。一方、入館者数は、ほぼ横ばいで推移している。平成19年度間の登録博物館・相当施設及び類似施設の入館者数は、およそ2億8千万人であり、これは国民1人あたり2回以上博物館を訪れている計算になる。しかし、博物館の数が全体的に増加しているために、1館あたりの入館者数は年々減少している。博物館別にみると、近年では入館者数5千人未満の博物館の割合が増加しており、博物館格差の広がりを意味している[2]。

博物館格差は拡大しているものの、博物館の規模や種類、設置形態などは様々であり、博物館の抱える問題の本質であるとは言い難い。したがって、博物館の抱える共通課題とは、このように多くの種類や規模の施設が存在する中で、各博物館に訪れた人のニーズにどのように対応していくか、すなわち、彼らにどれだけ満足してもらおうかといったことである。彼らが「また訪れたい」と思うための施策や工夫は博物館を活性化し、結果として、入館者だけでなく博物館へ訪れる人口である「博物館人口」そのものの底上げにつながることを期待できる。

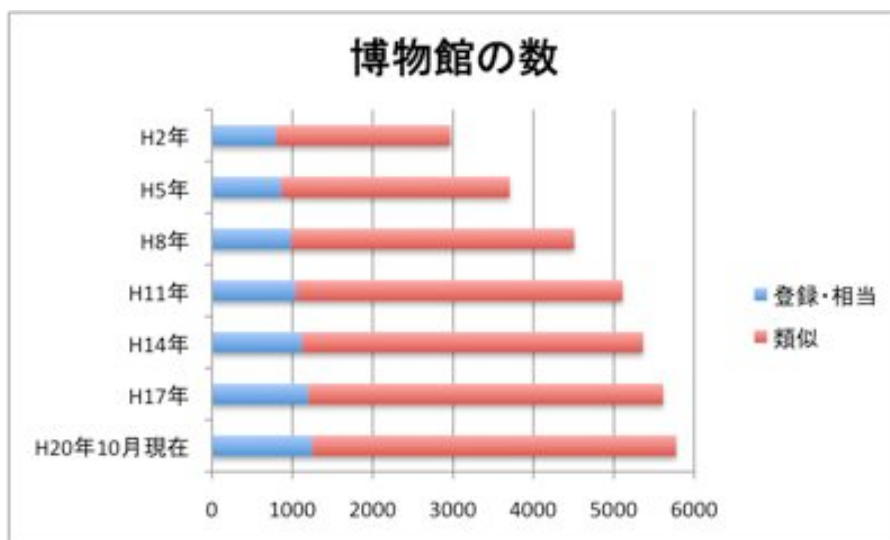


図 1-1 : 博物館数の推移¹

¹ 政府の統計総合窓口 : <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/eStatTopPortal.do>

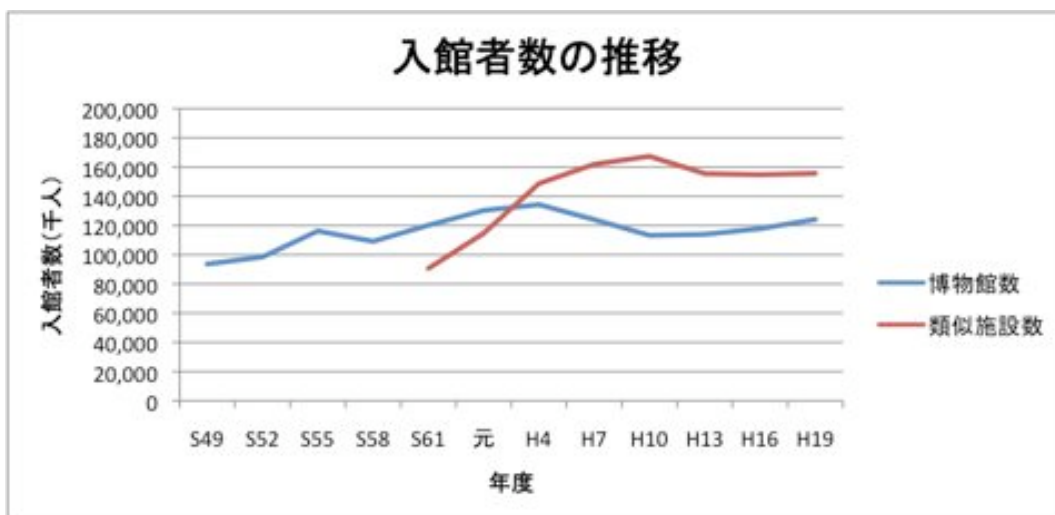


図 1-2 : 入館者数の推移²

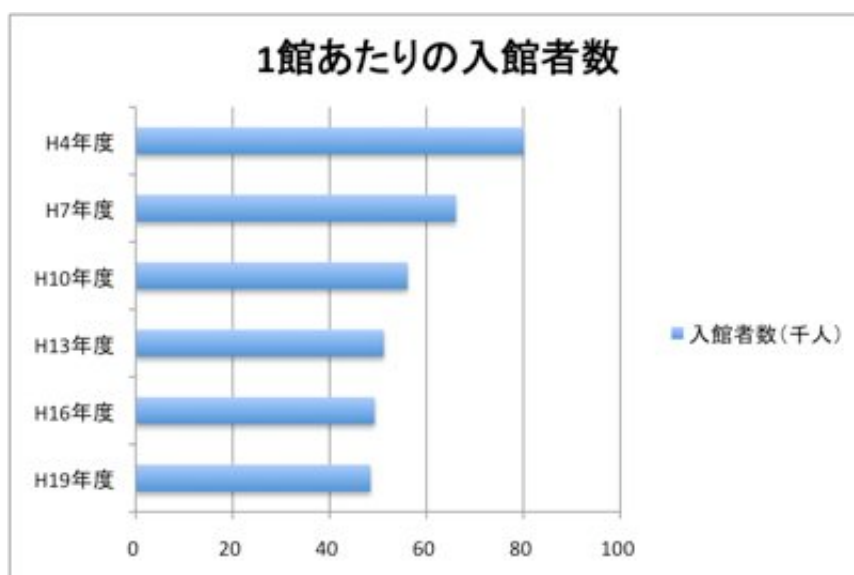


図 1-3 : 1館あたりの入館者数の推移³

² 政府の統計総合窓口 : <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/eStatTopPortal.do>

³ 政府の統計総合窓口 : <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/eStatTopPortal.do>

表 1-1：博物館別入館者数の割合⁴

	平成 9 年 (N=1,891)	平成 16 年 (N=2,030)	平成 20 年 (N=2,257)
5 千人未満	21.5	24.0	26.5
5 千人～1 万人未満	13.3	13.4	13.0
1 万人～3 万人未満	22.2	23.1	23.7
3 万人～5 万人未満	11.8	10.2	8.9
5 万人～10 万人未満	11.1	11.0	9.7
10 万人～20 万人未満	9.1	8.9	8.0
20 万人～30 万人未満	3.1	3.5	3.1
30 万人～50 万人未満	3.0	2.6	2.7
50 万人～100 万人未満	2.4	1.5	1.9
100 万人以上	1.3	0.6	0.9
無回答	1.5	1.8	1.6

この課題を解決するためには、来館者のニーズの把握が重要である。近年、来館者ニーズは多様化している。これは、人々のライフスタイルの変化が影響していると考えられる。まず、情報の入手が容易になった。インターネット技術の発達により、博物館へ行かなくても、欲しい情報を早急に手に入れることが可能である。そして、社会のグローバル化に伴い、海外に訪れる機会が増加した。これによって、現地で本物の文化財に触れることも多くなった。このような人々は、実物や写真を見たり、説明を読んだりしただけでは理解が難しい、より詳細な情報を求める傾向にある。しかし、その一方で、子どもや前提知識の少ない人も多く、分かりやすい情報提示が求められている。また、そもそも博物館へ足を運ぶ機会がほとんどないといった無関心な人もいる。彼らに対しては、新しい興味や関心のきっかけになるような体験を提供するといったアプローチが必要である。

1.1.2. 国の取り組み

近年の情報技術の発展は著しく、近い将来、社会イノベーションやライフスタイルの変化を引き起こすことが予想される。一方、博物館は、資料収集や保存、調査研究、展示、教育普及といった活動を一体的に行う施設であり、実物資料を通じて学習支援を行うといった点でも重要な役割を果たしている。今後、時間や場所の制約を受けることなく、文化を五感でインタラクティブに鑑賞体験できる仕組みは、新しい社会形成に大きな役割を果たし、社会貢献につながることを期待される。そういった背景から、国をあげた取り組みが行われている。平成 21 年度に「デジタル・ミュージアム実現のための研究開発に向けた要素技術及びシステムに関する調査検討」事業が文部科学省によって主催された。本研究の一部は、この事業の一環として共同で行われたものである。なお、本事業はアーカイブに関するものではなく、情報技術を用いてどのような展示手法が可能になるかといった「表現」に焦点をあてたものである。

⁴ 飯田浩之, 博物館をめぐる最近の動向--「博物館総合調査」過去 3 回の時系列比較, 博物館研究 45(2), pp3-7, 2010.

1.1.3. AR 技術の動向

情報技術の中でも拡張現実感（AR：Augmented Reality）の分野の研究開発は盛んに行われており、近年では、その多くが実用化されている。ARは、コンピュータによって作り出された仮想世界に完全にユーザを没入させる仮想現実感（VR：Virtual Reality）の技術に対し、現実環境にデジタル情報を付加提示して 利用者の活動を効果的に支援するユーザ・インターフェースの技術である。

ARの研究が始まった当初は、大掛かりなハードウェアが必要とされた。しかし、CPUの高性能化、小型カメラやディスプレイの高解像度化、センサの発達、無線ブロードバンドの普及などを背景として、現在ではモバイル機器での実現も可能になり、様々なアプリケーションを気軽に利用できるようになっている。

AR分野で利用されるディスプレイとして、これまでは透過型 HMD（Head Mounted Display）が用いられることが多かった[3]。HMDとは、両眼に映像表示部分をかぶせるように装着する装置で、ユーザに没入感の高い映像提示が可能である。また、透過型 HMDはコンピュータによって作り出された映像と、ディスプレイの外の現実世界も合わせて見ることができる。一方で、透過型 HMD以外のARディスプレイとして、空間型ARディスプレイの研究開発も行われてきた[4]。空間型ARディスプレイとは、HMDのようにユーザが装着するのではなく、ユーザのいる空間に設置するディスプレイである。例えば、ハーフミラーを用いて虚像を提示したり、プロジェクタを用いて直接実空間へ投影したりする手法がある。これらを用いれば、見る人はHMDを装着することなく、多人数で同時体験が可能となる。本研究では、この空間型AR技術を用いて新しい展示手法を提案する。

また、ARの適用範囲は広く、建築や医療分野、エンターテインメントなど様々な分野でARアプリケーションの開発や利用が進んでいる。ARの実現手法として多く提案されているが、3つの手法に大別できる。1つめに、位置情報を利用する手法である。携帯端末などに搭載されているGPS（Global Positioning System）や地磁気センサ（電子コンパス）、Place Engineのような位置取得サービスが提供されている無線LAN機器を用いて位置情報を取得し、関連するデジタル情報を配置する。2つめに、マーカを使う手法がある。この手法では、より正確に位置を特定して情報を重ねることができる。2次元バーコードのような白黒のパターンなどをマーカとして使用し、映像内にあるマーカを画像認識でリアルタイムにトラッキングし、マーカの場所を基点としてデジタル情報を描画する。ARToolKitは、マーカ型ARミドルウェアとして、今日広く用いられている[5]。これによって比較的簡単にARアプリケーションが開発できるようになった。そして3つめに、位置情報やマーカを必要としない、マーカレス手法の研究開発も行われている[6]。これらの手法を組み合わせて利用することで、ARの表現力はますます高まることが期待される。



図 1-4 : セカイカメラ ⁵



図 1-5 : 飛び出す電子絵本 AR Book (大日本印刷) ⁶

1.2. 研究目的

1.2.1. 雰囲気伝える空間型 AR 展示システム

以上のような背景をふまえて、我々の研究グループでは「雰囲気を伝える空間型 AR 展示システム」を提案した。本提案は、時空をさかのぼり、当時の人々の営みや息づかいなどの「雰囲気」を五感に伝える展示手法の実現を目的とするものである。従来のモノだけの展示では、その歴史や文化の理解が困難である。それが実際にどのように使われていたか、当時の人々の生活様式はどういったものか、などといった展示物の背景情報は、展示の理解への重要な糸口になる。そこで、この展示システムでは大画面 AR ディスプレイを設置して等身大の映像を表示し、鑑賞者に高い没入感で仮想空間を提示して 当時の雰囲気を表現する。そして、そこに実際の展示物を融合して、あたかも現地で展示を見ているような体験を提供する。

この展示手法では、以下のように多様な来館者ニーズに対応する。まず、モノを見ただけでは分からない展示物の背景情報、その時代や文化全体を含む雰囲気を映像で表現することで、より詳細な情報を分かりやすく提示する。また、実物と雰囲気情報を一緒に提示することで、展示物と文化、その他の展示品との「関係性」も理解することもできる。そ

⁵ 日経コミュニケーション編集部『ARのすべて-ケータイとネットを変える拡張現実』日経 BP 社, 2009.

⁶ 日経コミュニケーション編集部『ARのすべて-ケータイとネットを変える拡張現実』日経 BP 社, 2009.

して、等身大のスケールで映像を提示してその中に実物を出現されるといった表現によって、まるで現地にいるような感覚を与え、新しい興味や関心につながる事が期待できる。

展示技術として、空間型 AR 展示技術を用いる。本提案では、実物をショーケースの中に展示するのではなく、大画面ハーフミラーを組み込んだ展示会場の設置を想定している。これを用いて、CG 映像で表現された当時の仮想世界と展示物の置かれた空間を融合する。そして、博物館では実際の展示物を直接見ることが最も重要であることから、HMD を用いたビデオシースルー等の手法ではなく、空間の中で光学的に映像を融合する空間型 AR シアター手法によって、多人数の同時体験を実現する。

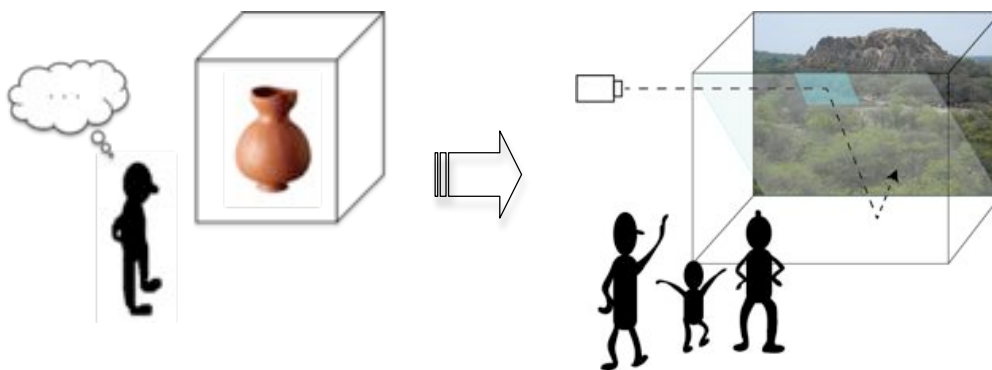


図 1-6 : As is To be

1.2.2. 実用化に向けての課題

空間型 AR 展示システムは、実用化にあたり 2 つの課題を抱えている。

第一の課題は、展示システムにおけるシーンの見え方が不安定なことである。雰囲気表現する場合、CG 映像だけを見せたり、展示物と CG 映像とを融合して見せたりといったシーンの切り替えが必要となる。したがって、CG 映像で見せたくない箇所を隠す機能が求められる。これによって、展示物のシルエットや位置に左右されることなく、シアターのように自由な表現でコンテンツ制作を行うことができ、展示コンテンツの表現の幅の広がりにつながる。また、そのような効果的なコンテンツを用いることで、鑑賞者を仮想世界に没入させることができる。しかし、場合によっては映像と展示物が重なって見えてしまうことがあり、シーンの切り替え表現は完全であるとは言えない。二重に見えてしまうと、鑑賞者に違和感を与えてしまい、雰囲気を伝えることはできず、理解の妨げになってしまう可能性がある。これまでに、空間型 AR 技術を用いた展示システムは実際に使用されてきた。ただし、虚像で実物体を隠すという表現方法はあまり用いられていないため、シーンの見え方に焦点を当てた評価は行われていない。そのため、効果的なコンテンツ制作を可能とするような指標が存在しない。これを解決するために、コンテンツ上でどのような工夫が可能かということに着目し、使用する色やアニメーションの効果が利用できないかと考えた。展示物を隠せない場合、シーンの見え方としては図 1-7 に示した例のように、風景の中にぼんやりと物体が浮かび上がって見える。物体が知覚される要因の中で、色による影響は大きい。色には物の弁別、検出、形の切り出し、物の同定の役割がある [7]。例え

ば、図 1-8 を見ると、明度差だけの右の円では、形状を検出することができないが、左の円のように色がつくと、目標の物体を背景から検出できる。CG 映像で現実物体を隠す場合においても、重ね合わせる色を工夫することで、鑑賞者にそれが認識されなくなる可能性がある。しかし、色合成の効果には限界がある。複数の色からなる展示物も多くあるため、色合成効果を利用したとしても展示物全体を隠しきれない場合が考えられ、別のアプローチが必要となる。そこで、アニメーションによる視点誘導効果も併用する。見せたい位置に鑑賞者の視点を意図的に誘導することで、結果的にシーンの見え方の向上につながると考えられる。

第二の課題は、展示コンテンツをどのように AR システムへ移行するかということである。現在、博物館で用いられている展示コンテンツは、3dsMax や Maya など汎用のモデリングソフトを用いて CG クリエーターが制作する場合がほとんどである。しかし、AR システムでのコンテンツ制作にはプログラミングが必須であり、モデリングソフトのデータを扱うことができない。そのため、コンテンツ制作からプログラミングを切り離す必要がある。

そこで、本研究の目的は色合成効果と視点誘導効果について評価実験を行い、効果的なコンテンツ制作のための指標を導き出すことである。最終的には、デモ展示を行い、この展示システムの有効性と本提案の妥当性を評価する。また、デモ展示で使用する展示コンテンツを例にデータの移行手法を提案し、実用性の高いシステム構築を目指す。



図 1-7：不完全な表現の例

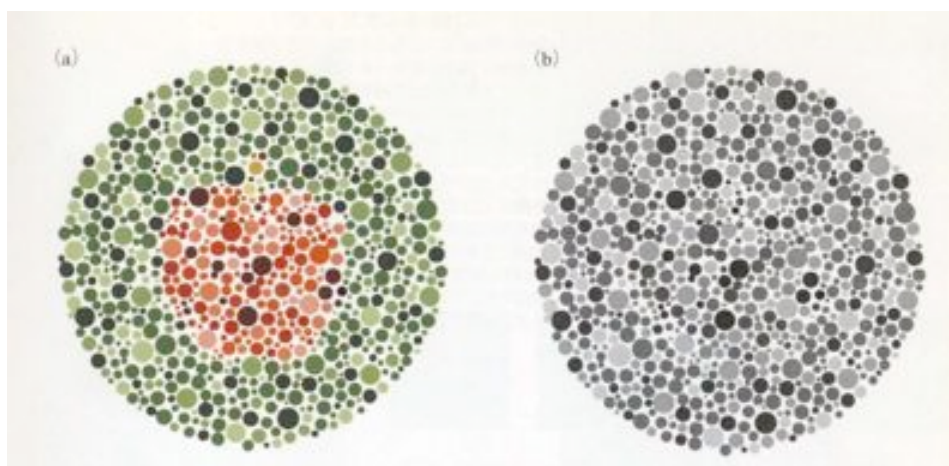


図 1-8：色の役割⁷

⁷ 内川恵二『色覚のメカニズム-色を見る仕組み-』朝倉書店, 1998 年

第2章 関連研究

2.1. 空間型 AR 技術に関する研究

博物館は、不特定多数の人が訪れる場である。機器の操作になれていない来館者にとって、HMD の装着や操作は難しく、運営側にとっても管理やメンテナンスが大きな問題となる。これらの理由から、本研究では空間型 AR ディスプレイを用いた展示手法を提案する。空間型 AR ディスプレイを用いることで、鑑賞者の高い自由度を実現でき、複数の人で同時体験が可能なシステムになる。

ここでは、これまで研究開発が行われた空間型 AR システムについて述べる。

2.1.1. Virtual Showcase

Bimber らによって提案された Virtual Showcase[8]は、ハーフミラーを用いたデスクトップ型の AR ディスプレイとして、実際に展示に用いられている。この展示システムでは、プロジェクタを照明として用いることで実物体と CG 映像との正しいオクルージョン表現を実現している[9]。

展示ケース内の空間と CG 映像を融合することによって表現の幅が広がり、インタラクティブな展示が可能となる。しかし、展示物を CG 映像によって完全に隠して、映像だけを表示するという手法は行われていない。また、デスクトップ型の小型展示システムでは、鑑賞者に高い没入感で仮想空間を提示することは難しい。



図 2-1 : Virtual Showcase⁸

⁸ <http://studierstube.icg.tu-graz.ac.at/virtualshowcase/>

2.1.2. dreamoc

dreamoc[10]は、AR 技術を用いた 3D ディスプレイシステムである。この展示システムは、3面のハーフミラーと液晶ディスプレイから構成されているため、鑑賞者は様々な位置から自由に展示物を見ることができる。

しかし、このシステムは小型製品の宣伝を行う目的で開発されているので、雰囲気表現に十分なサイズの映像を提示することができない。



図 2-2 : dreamoc⁹

2.1.3. Shader Lamps

Shader Lamps[11]は、プロジェクタで実物体に直接映像を投影することによって、様々な表現を可能にする。しかし、物体表面の当時の雰囲気は再現できるが、その周囲の雰囲気を表現することは難しい。

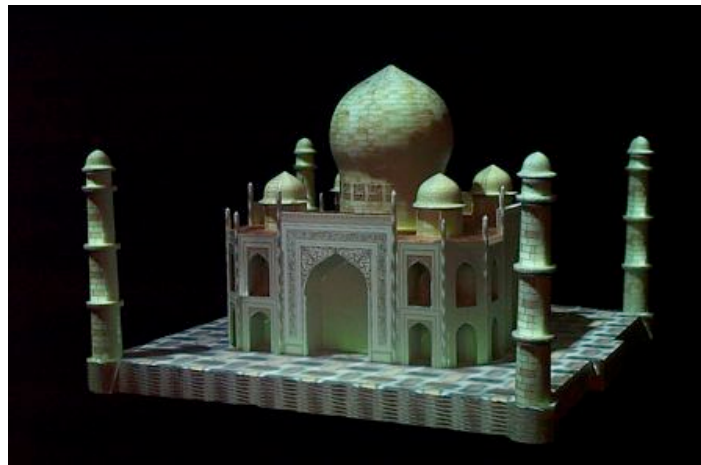


図 2-3 : Shader Lamps¹⁰

⁹ <http://audioviz.co.uk/dreamoc>

¹⁰ <http://web.media.mit.edu/~raskar/Shaderlamps/>

2.2. 博物館展示に関する研究

AR 技術は、本来見ることができないカタチを再生できるという特徴から、博物館における学習支援に多く利用されている。博物館における映像展示について、青木は大型映像、立体映像、スライド映像、マルチ映像、シミュレーション映像、特殊映像、インタラクティブ映像に分類している。特にその中で、ハーフミラーを用いて展示物に映像を合成するマジックビジョンは特殊映像、バーチャルリアリティはインタラクティブ映像にシミュレーション機能を加味した映像展示装置に分類されている [12]。そのような映像技術を用いた博物館展示に関する研究は、これまでにいくつか行われている。

ここでは、特に映像技術を用いて、展示物の背景情報や雰囲気表現を目的とした研究について述べる。

2.2.1. デジタル展示ケース

梶波らは、デジタル技術によって展示物の背景情報を伝達可能にする展示ケースシステムを提案している [13]。デジタル展示ケースは、展示ケースのように設置された 4 面の液晶ディスプレイとパネルから構成される、CG を利用したインタラクティブな展示装置である。磁気センサによって鑑賞者と円柱型オブジェクトの位置・姿勢を計測することで、展示物のハンドリングを可能とし、鑑賞者は自由な方向から見たい部分を鑑賞することができる。

しかし、この展示システムは 1 人の鑑賞者のみに対応する小型の展示システムであり、博物館のような多くの人々が訪れる施設では、複数の鑑賞者が同時に鑑賞できることが重要である。また、小型のシステムでは雰囲気表現することは難しい。



図 2-4 : デジタル展示ケース ¹¹

¹¹ <http://jp.diginfo.tv/2010/10/20/10-0228-f.jp.php>

2.2.2. 過去の様子を体験する展示システム

笠田らは、博物館などの過去の痕跡が残った場所において、その当時の様子を体験することを目的としたシステム構築を行った[14]。このシステムでは、過去の映像の撮影位置を推定し、その撮影位置における現在の風景と過去の映像を接続することで、過去の体験を実現する。鑑賞者は、撮影された地点に設置された HMD を着用し、過去の映像と展示物を合わせて見ることができる。

この展示システムでは、HMD を導入する必要がある。そのため、その運用やメンテナンスが大きな課題となる。また、それぞれの鑑賞者が機器を装着する必要があるため、一度に多数の来館者へ対応することが難しく、機器の装着に慣れていない人にとっては、少なからず負担になる。

2.3. 実際の応用例

空間型 AR 技術を用いた展示手法は、実際に展示会などで用いられている。

六本木の森アートセンターギャラリーで開催された『The Spirit of Beauty 展』では、ハーフミラーを用いた展示が行われた[15]。ここでは、展示ケース内にデザイナーが虚像として登場し、ジュエリーのデザインコンセプトやエピソードなどを解説している。ただし、映像は展示物に情報を補足する目的で使用されており、雰囲気 を伝える目的では用いられていない。



図 2-5 : The Sprit of Beauty¹²

¹² <http://www.roppongihills.com/events/2009/11/vancleef.html>

2.4. 色覚説

色覚に関する研究の歴史は古く、これまでに多くの研究がなされてきた。目が色の刺激を受けて感じる効果を色感覚といい、その感覚に基づいて色の状態を知ることの色知覚という。また、色の違いを識別する感覚を色覚といい、色覚が生じる原理を説いたものを色覚説という。

現在、その中でも段階説が最も有力な説とされ、三原色説と反対色説がその基礎となっている。色合成効果に関する実験計画を進める上で色覚は非常に重要となるため、ここでは、段階説と、その基礎となる三原色説、反対色説について述べる [16]。

i) 三原色説

Young が 1801 年に仮定し、Helmholtz によって 1868 年に完成された。ニュートンの理論が基礎になっており、三原色の加法混色により全ての色相が作り出せるとした。

人間の視覚系システムには R(赤)G(緑)B(青)に対応する 3 種類の錐状体 (L 錐状体、M 錐状体、S 錐状体) と、それぞれ独立に構成される神経結合による感覚神経があり、長波長、中波長、短波長の光を受けるとその刺激により色を知覚する。

ii) 反対色説

1874 年にドイツの生理学者 Hering によって唱えられた。等色は色覚の最も基本的な性質であるが、そこには色の見えは含まれていなかった。また、三原色説では赤い光と緑の光の混色によって生じる黄色の中に、赤と緑の存在を感じられないという矛盾点があった。Hering は、赤・緑・青・黄を知覚的主要色である心理四原色とし、「白—黒」「赤—緑」「黄—青」の三組の反対色を仮定し、あらゆる色相はこれらの組み合わせで表現できるとした。また、赤と緑、黄と青は互いに拮抗しており、1つの色相の中に赤みと緑み、あるいは黄みと青みは同時に存在しないとした。

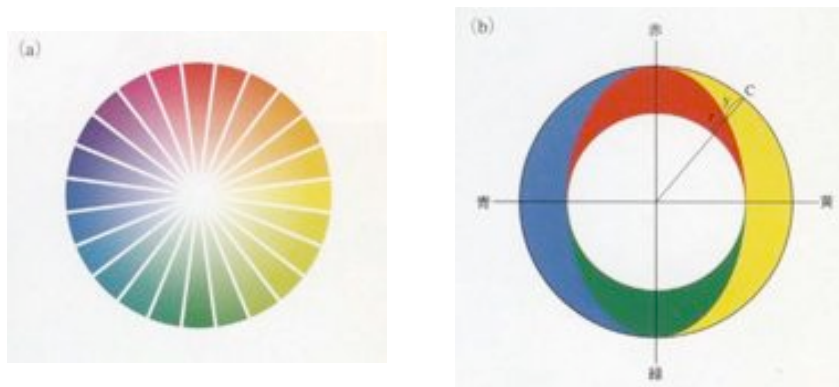


図 2-6 : 反対色説の色相環 (a)と反対色成分による表現 (b)¹³

¹³ 内川恵二『色覚のメカニズム-色を見る仕組み-』朝倉書店, 1998

iii) 段階説

長年にわたって三原色説と反対色説の論争が続いていたが、段階説によって両者が初めて1つの色覚モデルとして融合された。これは、視細胞レベルでは受容器として三原色モデルを、視神経及び脳内での情報処理レベルでは反対色説を組み合わせた説である。

L錐状体（R）からの信号とM錐状体（G）からの信号を比較することによって、赤みか緑みかの判断が行われ、L錐状体（R）とM錐状体（G）の信号を加算することによって黄みが判り、これをS錐状体（B）からの信号と比較して黄みか青みかの判断が行われる。また、これら3錐状体の入力信号の総和と杆状体からの入力信号により明るさの判断が行われる。

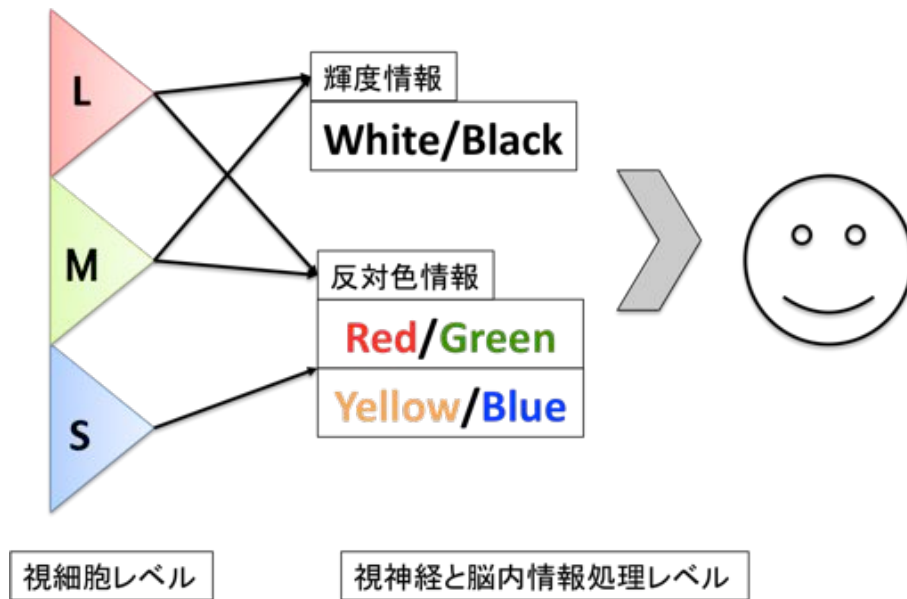


図 2-7 : 段階説

第3章 システムのコンセプト

本章では、システムのコンセプトと実現手法について述べる。システムの実装にあたり、まず、展示についての専門家（学者）や企画・運営の担当者をふまえて表現したい雰囲気について議論を重ね、雰囲気とは何かを検討した。次に、博物館展示、雰囲気表現、コンテンツクリエイターの3つの視点から、システム要求を検討した。

3.1. 雰囲気とは

まず、雰囲気とは何かを定義する。広辞苑によると「その場面または会合などにある一般的な気分・空気。周囲にある、或る感じ」とある。また、類語辞典には「その場所やそこにいる人たちが自然に作り出している、ある感じ」とある。このように、雰囲気は非常に曖昧なものであり、場所や時代によって様々で、人によって感じ方も一様でない。しかし、共通のキーワードとして雰囲気は「無形」であるということが出来る。これまでの展示は固いモノ、つまり「有形」の展示がほとんどであり、「無形」のものを展示するという試みは少なかった。「有形」の展示では、変化や動きを表現することが困難である。展示物の状態や現地の様子は、過去と現在では大きく異なり、実際の遺跡や発掘現場の中で展示物を見ることによって、その独特の空気を感じる事が出来る。そこで、本提案では、時空の変化を伴った街の賑わいや発掘現場の様子といった無形の感覚を雰囲気として表現することにした。

3.2. システム要求

博物館展示と雰囲気表現、コンテンツクリエイターの3つの視点から、システム要求を検討した。なお、博物館展示には、学者、運営企画、鑑賞者の観点を含む。

まず、博物館展示に求められる条件から検討した。博物館は老若男女、多くの人が訪れる場である。また、機器の装着は操作に慣れていない人にとって理解の妨げになる可能性があり、博物館にとっても、運営やメンテナンスが大きな負担となる。したがって、多人数で同時体験が可能で、なおかつ機器の装着や操作を伴わないシステムが望まれる。また、学者の方からは、本物を鑑賞者の目で直接見ることが最も重要だという意見をいただいた。ビデオシースルーのように、ディスプレイの映像を通して鑑賞するのではなく、目の前にある展示物を生で見るからこそ、博物館に訪れて初めて体験できることであり、多くの鑑賞者は本物を見るために博物館を訪れる。また、展示企画の観点では、展示コンテンツの変更が容易にできることも重要なポイントである。

次に、雰囲気を効果的に表現するために必要な機能を検討した。雰囲気を表現するためには、鑑賞者を完全に仮想世界に没入させることが必要になる。したがって、鑑賞者の視野を広範囲でカバーできることが重要である。また、CG映像によって表現される仮想世界と展示物の置かれた現実世界別々に見せる、あるいは融合して見せることによって、時空の変化や空間的な融合を表現する。そのために、CG映像によって隠すべき部分を完全に隠す機能が必要である。

コンテンツ制作を行う上では、汎用のモデリングソフトで容易にコンテンツ制作が可能であることや、既存の展示コンテンツが応用できるといったことが必要である。これは、システムの実用化を考えるうえで重要である。表 3-1 にシステム要求を示す。

表 3-1：システム要求

博物館展示	<ul style="list-style-type: none"> ・ 多人数で同時体験が可能であること ・ 機器の装着や操作が不要であること ・ メンテナンスや管理が簡単であること ・ 鑑賞者が自分の目で実物を鑑賞できること ・ 展示コンテンツの変更が容易に行えること
雰囲気表現	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大画面で映像表示ができること ・ 映像と実物を別々に見せたり、融合して見せたり できること
コンテンツ制作	<ul style="list-style-type: none"> ・ 汎用のモデリングソフトでコンテンツ制作が可能であること ・ 既存コンテンツの応用が可能であること

3.3. システム要素

ここでは、上記のシステム要求を実現する構成要素について述べる。以下のように各機能を割り当てた。

- ① 大画面ハーフミラーディスプレイ
 多人数での同時体験を可能にし、鑑賞者に機器の操作や装着を必要としない空間型 AR シアター方式を採用する。等身大の映像表現によって、臨場感のある仮想世界を表現する。また、空間型 AR 技術によって仮想世界と現実世界の融合を実現する。
- ② LED プロジェクタ
 仮想世界と現実世界の切り替えは、LED プロジェクタを照明用として用いることで実現する。
- ③ プログラムシステム
 プログラムシステムによって既存のコンテンツや汎用モデリングソフトによって制作されたコンテンツを空間型 AR 展示システムへ移行する。

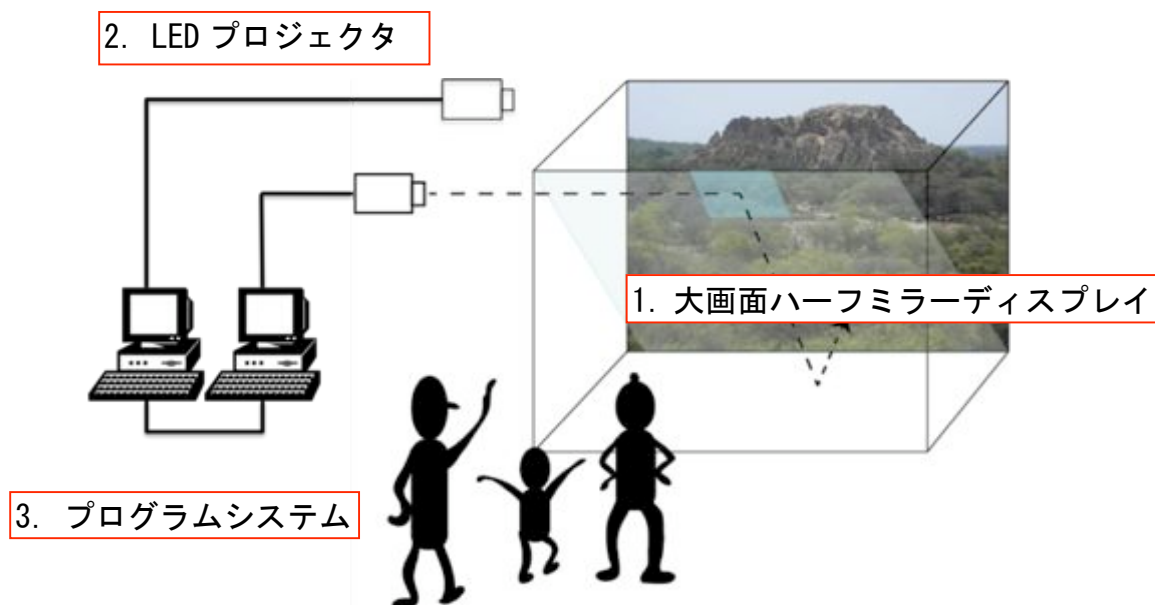


図 3-1：システム要素

第4章 空間型 AR 展示システム

4.1. ARView

本研究では、没入型プロジェクション技術（IPT：Immersive Projection Technology）の考え方に基づいて研究開発が行われてきた、没入型 AR ディスプレイシステムである ARView を展示分野へ応用する。IPT とは、大画面のスクリーンでユーザの周囲を覆うことでユーザに没入感の高い仮想空間を提示する技術である。ARView は、フィルム型のハーフミラーを使用しているため、大画面ハーフミラーディスプレイを設置することが可能となり、ユーザの視野を広範囲でカバーすることができる。この点において ARView は雰囲気表現するのに有効である。

村瀬らは、ARView の環境下において、現実物体と仮想物体間の正しいオクルージョンを表現するための手法を提案した [17]。本研究では、この手法を雰囲気表現に応用する。



図 4-1 : ARView での展示の例

4.2. システム構成

AR 展示システムの構成要素を以下に示す。

i) ハーフミラーフィルム

プロジェクタによって投影された映像と実際の展示空間を光学的に融合する。使用するハーフミラーは可視光透過率 87.8%と透過率が高く、鑑賞者に知覚されにくい。

ii) ステレオプロジェクタ

CG 映像を投影するためのプロジェクタとして、Stereo Graphics 社の DLP プロジェクタ DepthQ を使用した。

iii) LED プロジェクタ

オクルージョンを表現するために、展示物に光を当てる照明として用いる。本研究では、東芝製の LED プロジェクタ TDP-FF1A を用いた。

iv) PC

CG 映像レンダリング用と照明プロジェクタ用映像レンダリング用の 2 台の PC を使用する。



図 4-2 : DepthQ¹⁴



図 4-3 : TDP-FF1A¹⁵

¹⁴ <http://www.stereo3d.com/depthq.htm>

¹⁵ <http://vancouver.en.craigslist.ca/rch/ele/2183648504.html>



図 4-4 : ARView の外観

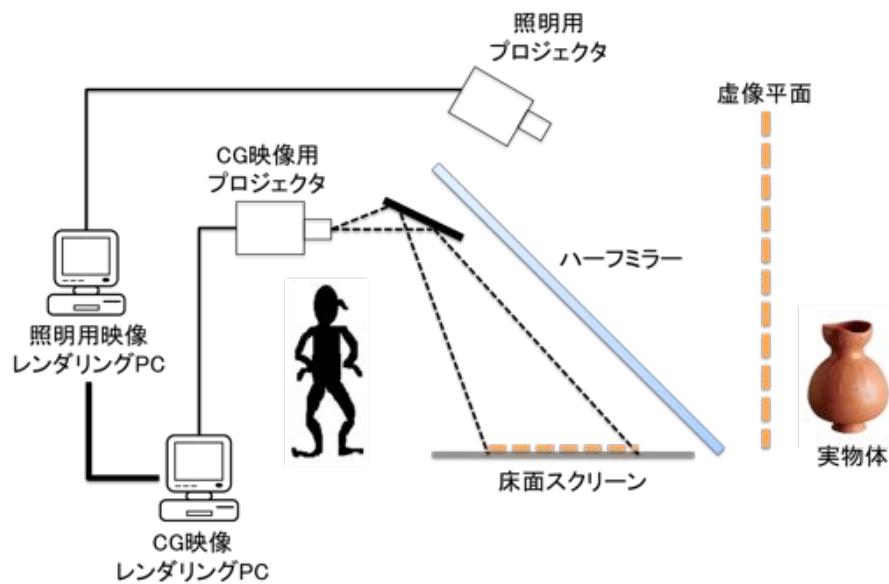


図 4-5 : システム構成

原理は次のようになる。まず、映像が鑑賞者の上部に設置された CG 映像用プロジェクタから、床面に設置されたスクリーンへ投影される。その映像は、床面に対して 45 度の傾斜で設置されたハーフミラーフィルム (3.0×4.5m) に反射される。したがって、鑑賞者は、正面の位置に映像を見ることができる。また、ハーフミラーフィルムの透過率が非常に高いため、鑑賞者の位置から映像だけでなく、後方に置かれた実物体も見ることができる。映像で表現された仮想世界と実物体を融合する場合は、照明用プロジェクタで実物体に光を当てると同時に、CG 映像用プロジェクタからは仮想世界の中で実物体が置かれた部分を黒くレンダリングした映像を投影する。すると、仮想世界の実物体部分を切り抜くことができ、そこから実物体を見ることができる。

4.3. オクルージョン表現手法

ここでは、ARView における実物体と仮想物体間のオクルージョン（隠蔽関係）の表現手法について説明する。ARView では、LED プロジェクタを実物体の照明として用いることで、正しいオクルージョン表現を実現している。

（ア）実物体が仮想物体より手前にある場合

1. 仮想映像の実物体が仮想物体と重なる部分を黒くレンダリングし、重なった領域を切り抜く。
2. LED プロジェクタから投影する映像に、実物体の白色のモデルを生成し、その部分だけに光を投影する。

（イ）実物体が仮想物体より後ろにある場合

1. LED プロジェクタから投影する映像で、仮想物体と重なる部分を黒くレンダリングし、その領域に照明が当たらないようにする。
2. その上から仮想映像を投影する。

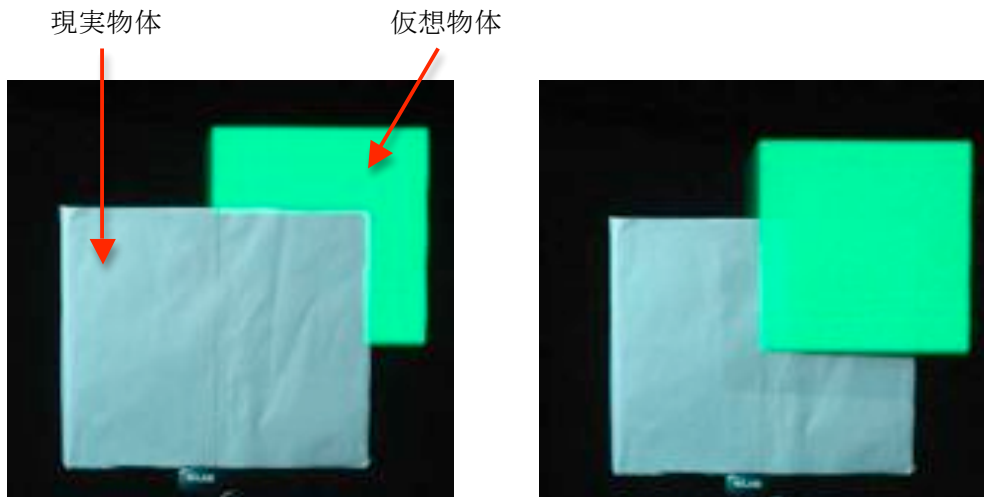


図 4-6：オクルージョン表現 16

¹⁶ 村瀬香緒里, 動的オクルージョン表現機能を備えた没入型 AR ディスプレイに関する研究, 筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科修士論文, pp19-20, 2009.

4.4. 実験装置の構築

4.4.1. システム構成

本研究では、評価実験を行うために実験環境を構築する必要がある。そこで、図 4-7 と図 4-8 に示すような小型の実験装置を構築した。サイズは高さ 650mm、幅 800mm である。また、展示物の大きさに合わせて、映像サイズや展示物設置位置を調整できるようにした。

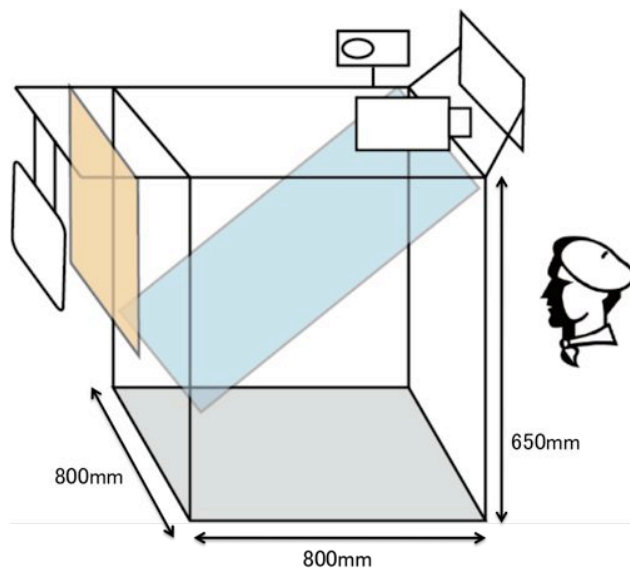


図 4-7：実験装置のシステム構成



図 4-8：実験装置の外観

3.4.2. 台形補正と投影サイズ

この展示システムでは、システムの上部にプロジェクタを設置し、ミラーに反射させてスクリーンに映像を投影している。そのため、スクリーンに投影した映像は台形歪みを生じており、補正する必要がある。OpenGLを使用したプログラムでの歪み補正の方法として、テクスチャマッピングを使用した二重レンダリングの方法[18]があるが、1フレームに対する描画処理速度が低下し、フレームレートが小さくなることが考えられた。ARViewの環境下では、時分割方式の立体映像を投影することを考慮して簡易台形歪み補正の手法[19]が用いられた。この手法は、仮想映像を生成するプログラム上で台形歪み補正を行うものである。本研究で構築した実験装置では、投影距離が近いこと、歪みもそれほど大きくない。そこで、使用したプロジェクタ DepthQ の台形歪み補正機能で対応した。DepthQ の補正機能では、 $\pm 10^\circ$ まで補正することができる。実験装置における台形歪み補正後の投影サイズを図 4-9 に示す。なお、これはスクリーンを実験装置の上部より 65cm の位置に設置した場合のサイズである。

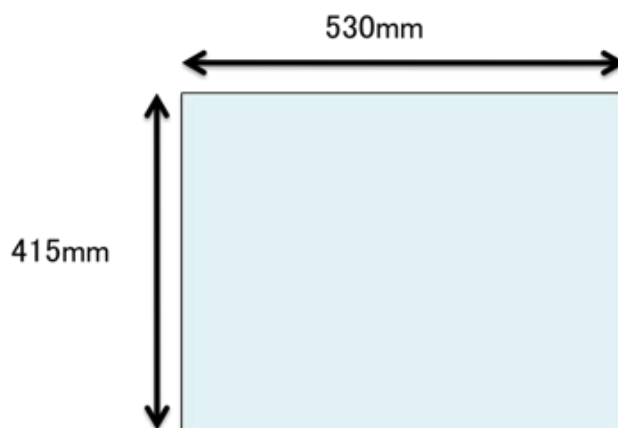


図 4-9 : 投影サイズ

4.5. 展示コンテンツの利用

これまで、AR システムのコンテンツ制作には、OpenGL などのグラフィックライブラリを用いたプログラミングが必須であったため、専門知識が必要であった。しかし、現在博物館などで上映されている映像コンテンツのほとんどが 3DCG モデリングソフトウェアによって制作されている。そのため、空間型 AR 展示システムで展示コンテンツを実装するためには、コンテンツ制作とプログラミングを切り離す必要があった。

そこで本研究では、3DCG アプリケーション制作ツールである REMO (株式会社アイネット) を用いたプログラムシステムを用い、データの移行を行った。これによって、モデリングソフトで制作されたコンテンツを AR システムで実装することが可能になり、既存の展示コンテンツの再利用ができるようになる。また、プログラミングの専門知識がなくてもコンテンツを制作することができるので、実用性の向上が期待できる。

4.5.1. 3DCG ソフトウェア

3DCG は、コンピューター・グラフィックの分野で3次元空間にモデリングする技術を指す。今日、映像制作の分野でよく用いられているソフトウェアとしては「3ds Max」、
「MAYA」、「SOFTIMAGE」などがある。これらのソフトウェアは多様な機能を持ち、レンダリングをトータル的にサポートしている。以下に、3DCG ソフトウェアを用いたコンテンツ制作の基本的な流れを示す。

コンテンツ制作の流れ

1. モデリング

形状を作成する。



2. 質感設定

作成したモデルにマテリアルやテクスチャを設定して、質感を決定する。



3. ライティング

照明設定を行う。照明の種類を決定し、それに応じて陰影をつける。



4. アニメーション

アニメーションを設定する。モデルの動きだけでなく、カメラワークや質感変化もここで定義する。また、キャラクターにアニメーションをつける場合は、パーツごとに1つのグループとして定義する。

通常、映像制作の場合の3DレンダリングはNTSC¹⁷の規格に基づいて1秒30フレームとして制作される。3dsMaxにおいて、時間はフレーム数として定義される。フレームを指定し、フレームごとに動きを登録する。



5. レンダリング

制作したデータをフレームごとに計算して、静止面を作成する。

4.5.2. REMO

REMO^[20]は、3DCGアプリケーション制作ツールである。3dsMaxのプラグインソフトREMO Exporterとコンバータによって、3dsMax上で制作された展示コンテンツをARシステムに移植する。

手順は次のようになる。まず、3dsMax上で制作されたデータ(.max)をREMO Exporterによって、REMOデータ(.xrm)に変換する。次に、コンバータでARシステムに読み込み可能なデータ(.rmw)に変換する。最終的に、そのデータがREMOライブラリを用いたプログラムに読み込まれ、ARシステムで実装することができる。

先述したように、汎用のモデリングソフトの中でシナリオ定義を全て完了することができる。つまり、コンテンツ制作はモデリングソフト上で全て行うことができる。REMOを用いれば、コンテンツ制作の工程からプログラミングを完全に切り離すことができ、ARシステムへのデータ移植の課題が解決される。

¹⁷ National Television Standards Committee：日米のビデオ標準

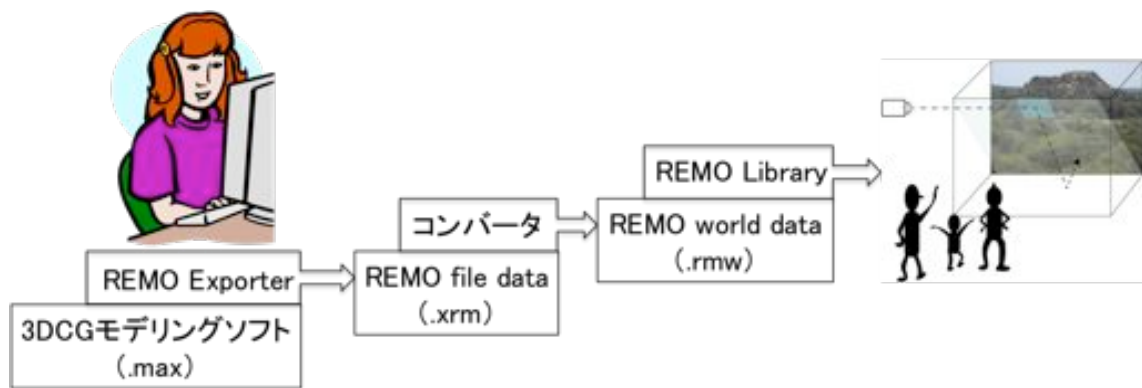


図 4-10 : REMO によるデータの変換フロー

4.5.4. AR 展示システムでの実装方法

i) コンテンツ制作手法

仮想世界と現実世界の融合を実現するために、CG 映像用のプロジェクタから投影する映像と照明用プロジェクタから投影する映像の 2 つのシーンを 3dsMax 上で作成する必要がある。前者は仮想世界を表現したもので、後者は展示物の黒い 3D モデルを描写したものである。このとき、仮想世界のシーンには通常のアニメーションに加えて、融合表現のタイミングで黒い展示物のモデルをシーンの中に出現させるか、シーンの中の仮想の展示物を黒くするようなアニメーションも設定する。また、照明用のシーンには、仮想世界と展示物が合成されるタイミングで、黒い展示物のモデルが白く変化するアニメーションを設定する。

次に、データの変換工程に入る。これらのデータは REMO Exporter によって XRM フォーマットへ変換される。そして、最終的にはコンバータで AR システムでも読み込み可能な RMW フォーマットのデータへと更に変換される。

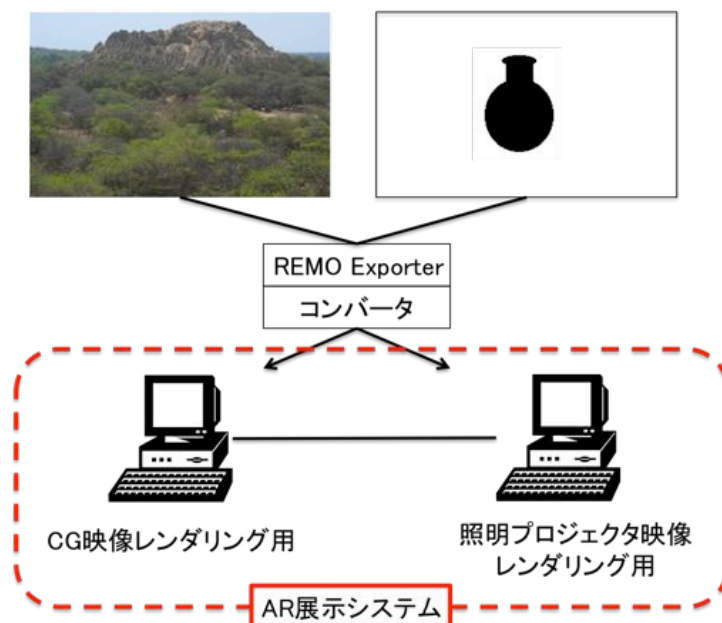


図 4-11 : AR 展示システムまでのデータの流れ

ii) シーンの切り替え手法

AR システムでは、2 台のプロジェクタの映像を投影するタイミングを制御することでシーンの切り替えを実現している。表現として、仮想映像だけを提示する場合と展示物だけを見せる場合、そして仮想世界と展示物を融合する場合がある。このとき、照明プロジェクタ用の映像生成には、OpenGL ベースのプログラムに基づいたシャドウマッピングのアルゴリズムを応用している [22]。本研究では、これを実現するために REMO ライブラリを使用している。図 4-12 に AR システムのソフトウェア構成を示す。ただし、この手法を用いるためには、照明プロジェクタのレンズ位置、レンズ光軸方向、照明プロジェクタの姿勢方向、照明プロジェクタの投影位置とサイズをあらかじめ取得していることが前提となる。これらの情報をもとにして、ユーザの視点位置をカメラ位置とした映像が一度生成され、それをまた、プロジェクタのレンズ位置をカメラ視点とした映像にレンダリングし直す。そうして生成された映像を投影することで、ユーザから見たときに展示物の部分にだけ照明を当てることができる。以下に、それぞれ表現のときにどのような制御がなされているかを示す。また、そのときに投影される、ユーザの視点から見た映像を示す。

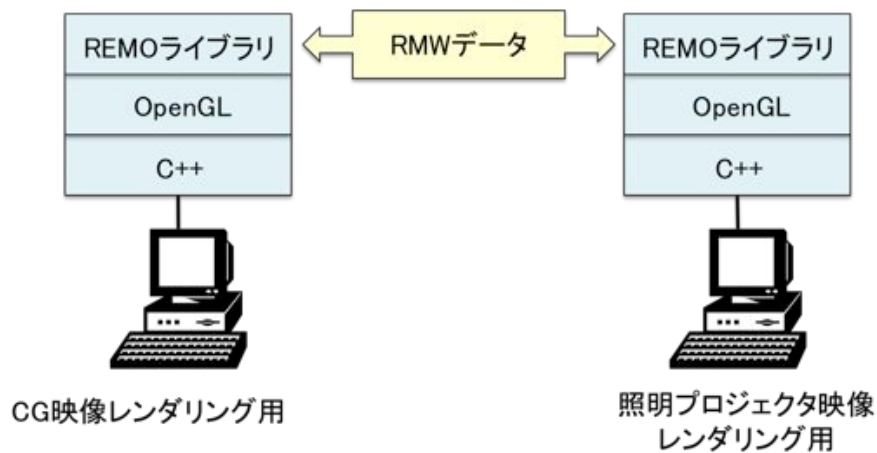


図 4-12 : AR 展示システムのソフトウェア構成

① 仮想映像だけを提示する場合

展示物に照明を当てずに、CG 映像だけを投影する。

このとき、照明プロジェクタ用の PC は展示物の黒いモデルをレンダリングしている。ただし、背景の黒に同化しているため、黒一色で塗りつぶされた映像をレンダリングしていることになる。

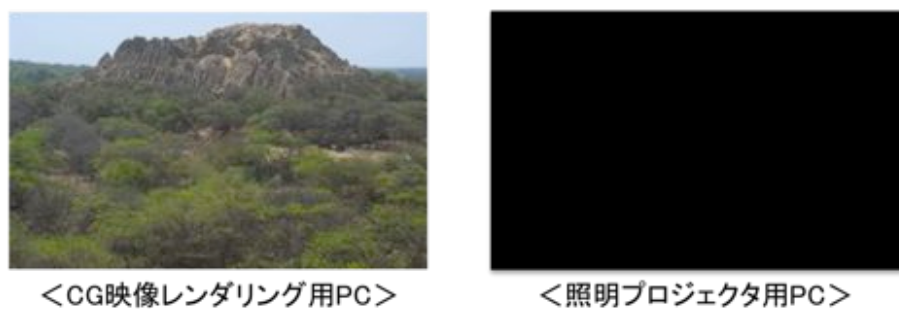


図 4-13 : 仮想映像だけを提示する場合

② 展示物だけを見せる場合

CG 映像を消して、展示物に照明を当てる。

CG 映像用の PC では、映像をブラックアウトするなどして真っ黒の映像をレンダリングする。照明プロジェクタ用の PC は、展示物の白いモデルをレンダリングする。

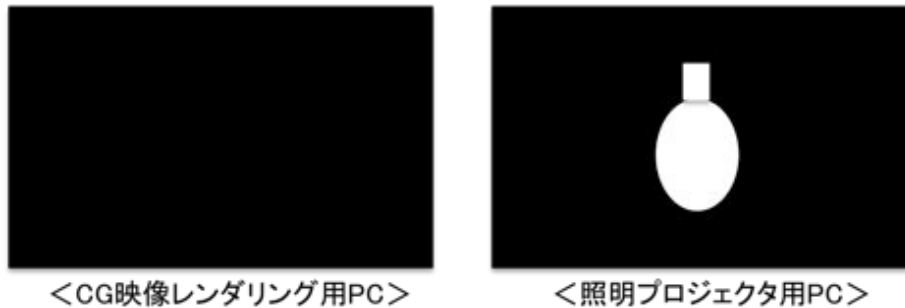


図 4-14：展示物だけを見せる場合

③ 仮想世界と展示物を融合する場合

CG 映像にある仮想の展示物の部分を切り抜くと同時に、展示物に照明を当てる。

CG 映像用の PC は、仮想の展示物を黒くレンダリングする。このとき、照明プロジェクタ用の PC は、仮想の展示物が黒くなるのと同じタイミングで展示物の白いモデルをレンダリングする。

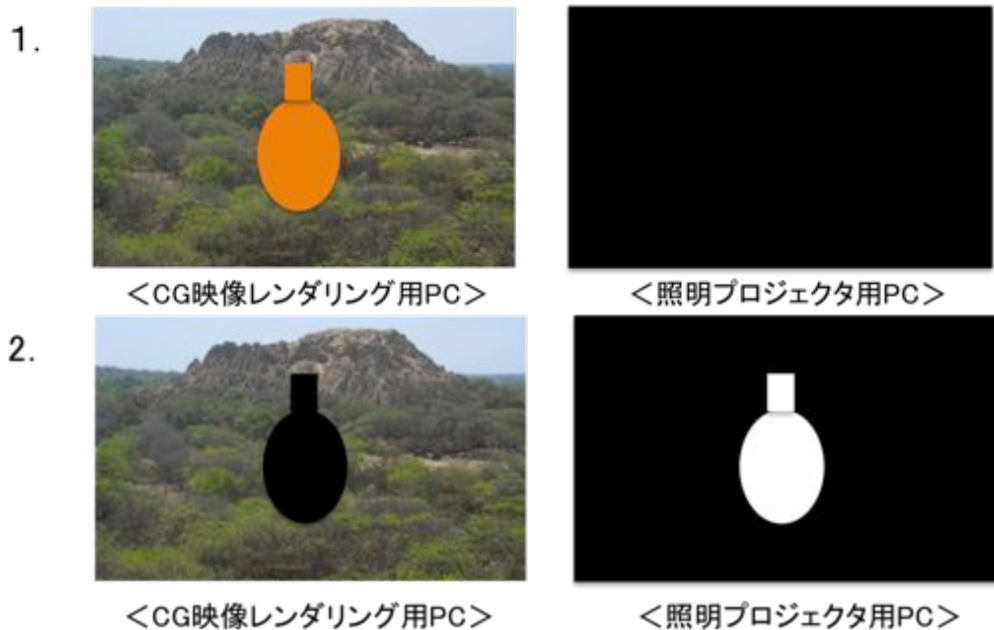


図 4-15：仮想世界と展示物を融合する場合

第5章 色合成効果に関する実験

5.1. 展示物の色の明度に関する実験

5.1.1. 概要

空間型 AR 展示システムを用いる場合、CG 映像投影用のプロジェクタと照明用プロジェクタを制御することで、CG 映像だけを見せたり、展示物を見せたりすることができる。展示物を CG 映像で隠したい場合、照明用プロジェクタは展示物に光を当てないように制御される。逆に、展示物を見せたい場合は、展示物へ照明が当てられる。このことから、この展示システムにおけるシーンの見え方は色の明度（明るさ）が強く影響していることが考えられた。

そこで、まず、本実験では展示物の色の明度が見え方に与える影響を検証した。

5.1.2. 実験方法

実験は、実験装置を用いて行った。展示物の代わりにして使用する実物体をハーフミラーの後方 400mm の位置に設置し、実物体に照明を当てずに仮想映像だけを表示した状態で、実物体がどのように見えるのかを評価した。被験者は 10 名で、被験者 1 人につき 3 回繰り返し実験を行った。

A) 実物体

色味を持たない無彩色の中から、明度値の異なる 4 枚の色見本カードを使用した。カードの配置はランダムとし、被験者が変わる毎に並びを変えた。

なお、色見本カードは（株）日本カラーデザイン研究所の色見本カード「デザイントーン 130 色紙 S (91mm×64mm)」を用いた。

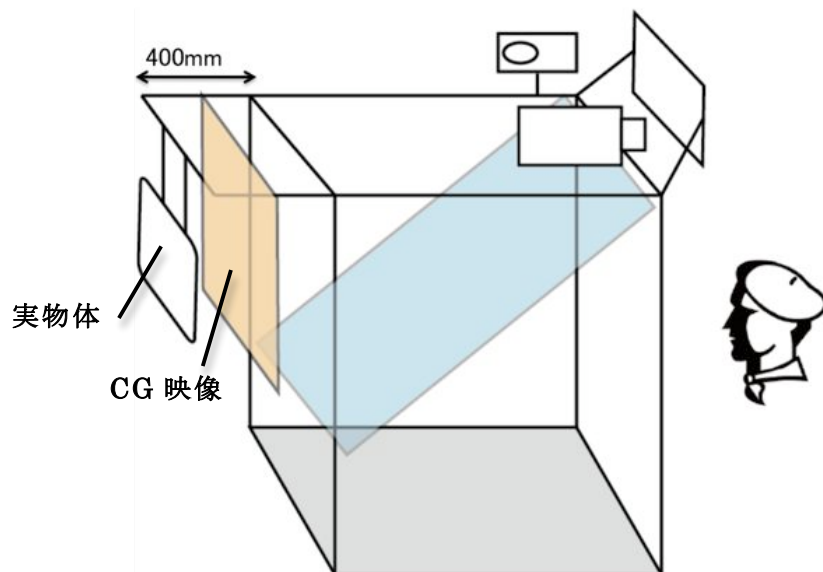


図 5-1 : 実物体設置位置

表 5-1 : カードの明度値

カード No.	明度値
1	N9.5
2	N7
3	N4
4	N1.5

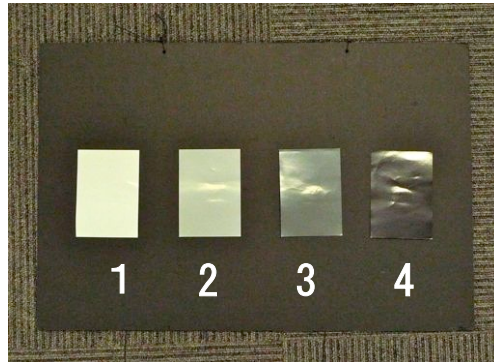


図 5-2 : カードの配置例

B) CG 映像

OpenGL ライブラリを用いて、単一色で塗りつぶされた映像を表示した。5色を1グループとして、色味を持たない無彩色と色味を持つ有彩色に分けて実験を行った。20秒毎に色が変化し、表示順はランダムとした。

➤ 無彩色

CG 映像の色の明度（映像光の強さ）の影響を検証する。

明度は色味と鮮やかさを持たない無彩色を基準とし、理想的な黒は0、理想的な白は10で表される。OpenGL では、RGB の値を0.0~1.0の間で色を指定する。そこで、白と黒を明度の最大値と最小値とし、等間隔になるように以下の中間色を指定した。表 5-2 に RGB 値を示す。

➤ 有彩色

CG 映像が色味と彩度を持つ、有彩色の場合の影響を検証する。

色相はマンセル色相環に基づき、R（赤）・Y（黄）・G（緑）・B（青）・P（紫）の5主要色を用いた。有彩色の明るさは明度か彩度を一定とした場合でも、人が感じる感覚とは異なり、厳密に統一することが難しい。そこで、トーン概念に基づき、中央値の明度と最大値の彩度をとる純色（ビビッドトーン）にトーンを合わせた。表 5-3 に RGB 値を示す。

※トーン[21]

トーンとは、明度と彩度の複合概念ともいえるもので、色相の同じ系列でも、明・暗、強・弱、濃・淡、浅・深の調子の違いがある。この色の調子の違いをトーンという。同一トーンのグループにある色でも、明度の違いはあるが、心理的な明るさを揃えることができる。

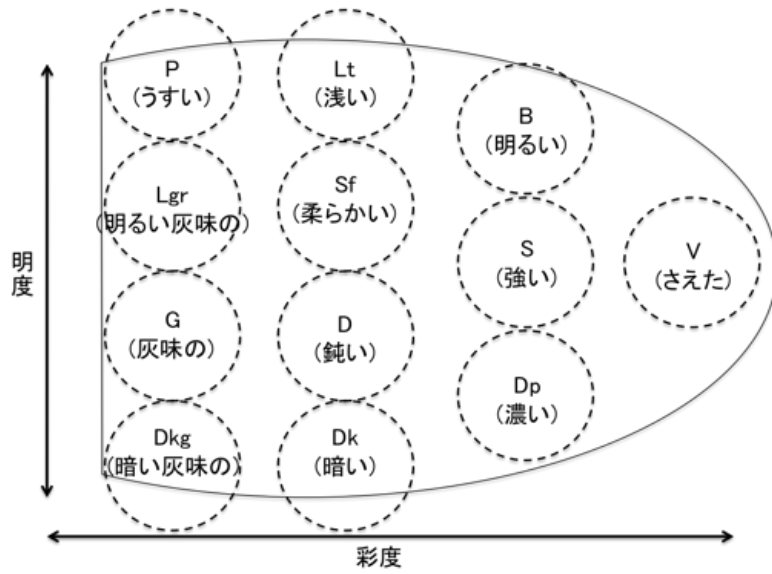


図 5-3 : トーン概念

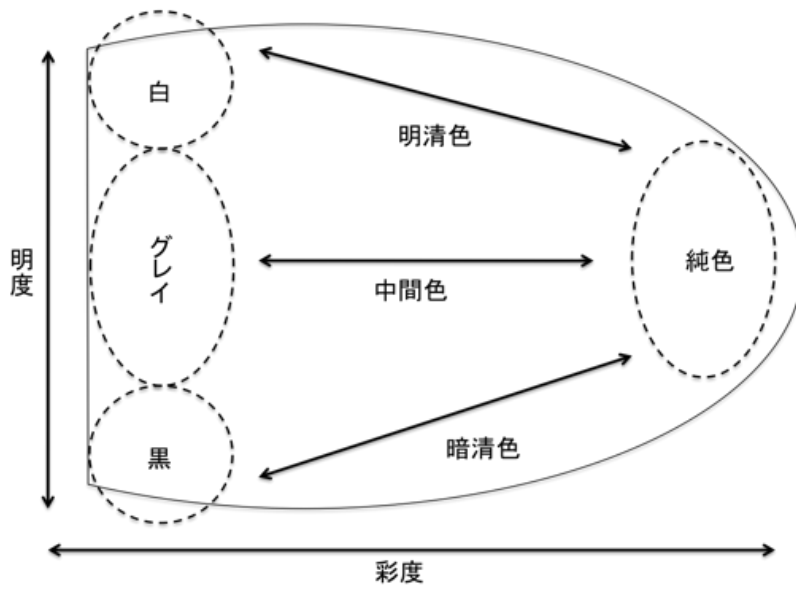


図 5-4 : トーンの配置図

表 5-2 : 無彩色の RGB 値

	R 値	G 値	B 値	マンセルカラーシステム	色見本
白	1.0	1.0	1.0	N10	
グレー 1	0.8	0.8	0.8	N8	




グレー 2	0.6	0.6	0.6	N6	
グレー 3	0.4	0.4	0.4	N4	
グレー 4	0.2	0.2	0.2	N2	

表 5・3 : 有彩色の RGB 値

	R 値	G 値	B 値	マンセルカラーシステム	色見本
赤	0.93	0.10	0.24	4R 3.5/11	
黄	1.00	0.83	0.00	5Y 8/14	
緑	0.00	0.50	0.00	2.5G 6.5/10	
青	0.00	0.60	0.84	10B 4/14	
紫	0.65	0.34	0.66	0.3RP 4.8/12.2	

C) 評価方法

表 5-4 に示した評価基準に基づき、カードの見え方の 5 段階で評価した。評価は、映像の色が変わる毎に全てのカードについて行った。

表 5-4 : 評価基準

点数	評価基準
2	カードが完全に見えない
1	カードがほとんど見えない
0	どちらでもない
-1	カードがやや見える
-2	カードが完全に見える

5.1.3. 結果

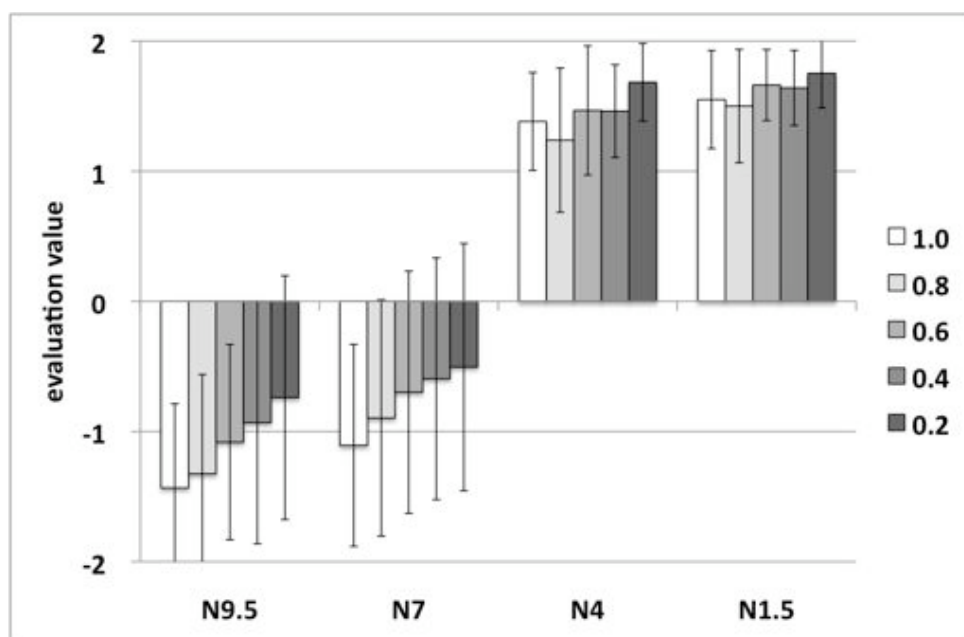


図 5-5 : 無彩色映像×カード

表 5-5 : 二元配置分散分析結果 (無彩色映像)

ソース	タイプ III 平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
修正モデル	284.781 ^a	19	14.988	115.256	.000
切片	9.859	1	9.859	75.811	.000
card	278.822	3	92.941	714.678	.000
image	4.864	4	1.216	9.351	.000
card * image	1.095	12	.091	.702	.748
誤差	18.206	140	.130		
総和	312.846	160			
修正総和	302.987	159			

a. R2 乗 = .940 (調整済み R2 乗 = .932)

表 5-6 : カードを要因とする多重比較結果 (無彩色映像)

Tukey HSD

(I) card	(J) card	平均値の差 (I-J)	標準誤差	有意確率	95% 信頼区間	
					下限	上限
N1.5	N4	.1771	.08064	.129	-.0326	.3868
	N7	2.5396*	.08064	.000	2.3299	2.7493
	N9.5	2.8888*	.08064	.000	2.6791	3.0984
N4	N1.5	-.1771	.08064	.129	-.3868	.0326
	N7	2.3625*	.08064	.000	2.1528	2.5722
	N9.5	2.7117*	.08064	.000	2.5020	2.9213
N7	N1.5	-2.5396*	.08064	.000	-2.7493	-2.3299
	N4	-2.3625*	.08064	.000	-2.5722	-2.1528
	N9.5	-.3492*	.08064	.000	.1395	.5588
N9.5	N1.5	-2.8888*	.08064	.000	-3.0984	-2.6791
	N4	-2.7117*	.08064	.000	-2.9213	-2.5020
	N7	-.3492*	.08064	.000	-.5588	-.1395

観測平均値に基づいています。

誤差項は平均平方 (誤差) = .130 です。

*. 平均値の差は 0

表 5-7 : カード 1 についての多重比較結果

Tukey HSD

(I) image	(J) image	平均値の差 (I-J)	標準誤差	有意確率	95% 信頼区間	
					下限	上限
.20	.40	.24583	.20796	.761	-.3521	.8437
	.60	.31667	.20796	.555	-.2812	.9146
	.80	.61875*	.20796	.040	.0208	1.2167
	1.0	.69167*	.20796	.017	.0938	1.2896
	0					
.40	.20	-.24583	.20796	.761	-.8437	.3521
	.60	.07083	.20796	.997	-.5271	.6687
	.80	.37292	.20796	.394	-.2250	.9708
	1.0	.44583	.20796	.225	-.1521	1.0437
	0					
.60	.20	-.31667	.20796	.555	-.9146	.2812
	.40	-.07083	.20796	.997	-.6687	.5271
	.80	.30208	.20796	.599	-.2958	.9000
	1.0	.37500	.20796	.388	-.2229	.9729
	0					

.80	.20	-.61875*	.20796	.040	-1.2167	-.0208
	.40	-.37292	.20796	.394	-.9708	.2250
	.60	-.30208	.20796	.599	-.9000	.2958
	1.0	.07292	.20796	.997	-.5250	.6708
1.00	.20	-.69167*	.20796	.017	-1.2896	-.0938
	.40	-.44583	.20796	.225	-1.0437	.1521
	.60	-.37500	.20796	.388	-.9729	.2229
	.80	-.07292	.20796	.997	-.6708	.5250

*. 平均値の差は 0.05 水準で有意です。

表 5-8 : カード 2 についての多重比較結果

Tukey HSD

(I) image	(J) image	平均値の差 (I-J)	標準誤差	有意確率	95% 信頼区間	
					下限	上限
.20	.40	.10833	.19895	.982	-.4637	.6803
	.60	.21875	.19895	.806	-.3532	.7907
	.80	.46042	.19895	.165	-.1116	1.0324
	1.00	.65208*	.19895	.019	.0801	1.2241
.40	.20	-.10833	.19895	.982	-.6803	.4637
	.60	.11042	.19895	.981	-.4616	.6824
	.80	.35208	.19895	.407	-.2199	.9241
	1.00	.54375	.19895	.069	-.0282	1.1157
.60	.20	-.21875	.19895	.806	-.7907	.3532
	.40	-.11042	.19895	.981	-.6824	.4616
	.80	.24167	.19895	.743	-.3303	.8137
	1.00	.43333	.19895	.212	-.1387	1.0053
.80	.20	-.46042	.19895	.165	-1.0324	.1116
	.40	-.35208	.19895	.407	-.9241	.2199
	.60	-.24167	.19895	.743	-.8137	.3303
	1.00	.19167	.19895	.870	-.3803	.7637
1.00	.20	-.65208*	.19895	.019	-1.2241	-.0801
	.40	-.54375	.19895	.069	-1.1157	.0282
	.60	-.43333	.19895	.212	-1.0053	.1387
	.80	-.19167	.19895	.870	-.7637	.3803

*. 平均値の差は 0.05 水準で有意です。

図 5-5 に無彩色映像を表示した場合の結果を示す。グラフの縦軸が評価値、横軸がカードの明度値、棒グラフの色が映像の色を示す。評価値が高いほどカードがよく隠れたことを示し、効果的なシーンの切り替えが可能ということになる。また、エラーバーは標準偏差を示す。

結果、カードの明度値が低いほど、カードは被験者に認識されにくかった。特に、N4 と N1.5 のカードは、ほとんど被験者に認識されなかった。逆に、カードの明度値が高いほど、カードを隠すことが難しい。ここで仮に、N9.5 と N7 のカードを隠しにくいグループ、N4 と N1.5 のカードを隠しやすいグループに分類する。まず、隠しやすいグループをみると、映像の色に関わらず、カードは被験者に認識されにくいことが分かる。一方、隠しにくいグループを見ると、最も明るい映像 1.0 から最も暗い映像 0.2 にかけて、段階的に評価値が良くなっており、何らかの傾向を読み取ることができる。

以上の結果をもとに、カードの色と映像の色を要因とする二元配置分散分析を行った。結果を表 5-5 に示す。分析の結果、カードの色を要因とする効果、映像の色を要因とする効果がともに 1% 有意であった。次に、カードの色の効果について、多重比較による分析を行った。結果を表 5-6 に示す。結果は、次のようになった。まず、N9.5 のカードは、N4 と N1.5 との間に有意差があった。N7 のカードも、N4 と N1.5 との間に有意差があった。N4 のカードについては N9.5 と N7 と N1.5 のすべての間で有意差があった。N1.5 のカードも N9.5 と N7 と N4 のすべての間で有意差があった。また、隠しにくいカードのグループに見られた傾向を検証するために、N9.5 と N7 のカードについて映像の色を要因とする多重比較を行った。結果、N9.5 のカードでは、映像 1.0 と映像 0.2 の間、映像 1.0 と映像 0.4 の間で有意差があった。N7 のカードでは、映像 1.0 と映像 0.2 の間で有意差があった。結果を表 5-7 と表 5-8 に示す。なお、N4 と N1.5 のカードでは、映像の色による差は統計的に有意ではなかった。

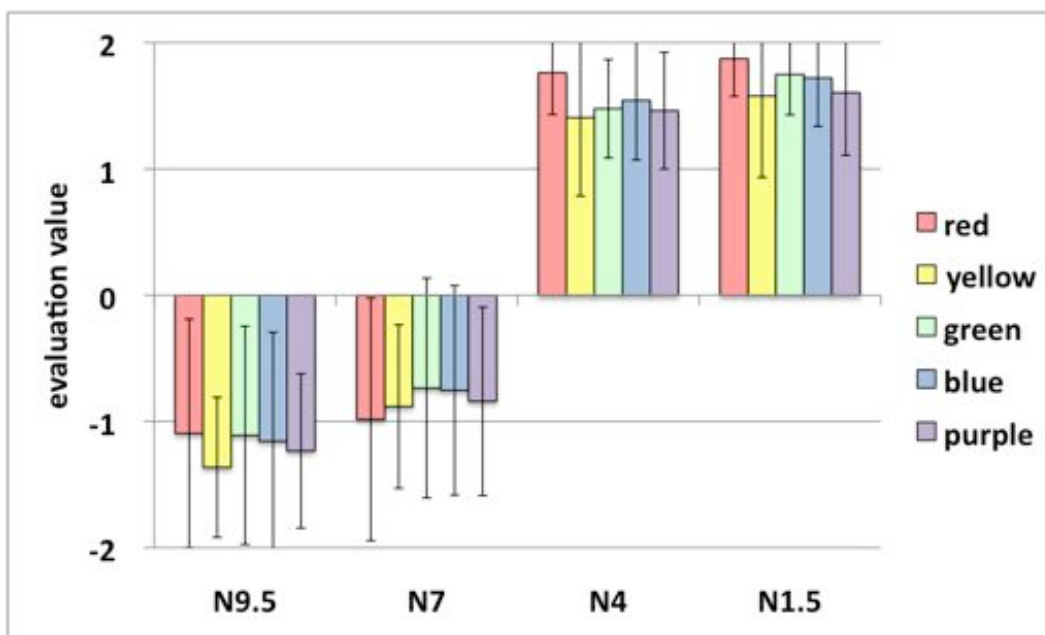


図 5-6：有彩色映像×カード

表 5-9：二元配置分散分析結果（有彩色映像）

ソース	タイプ III 平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
修正モデル	317.761 ^a	19	16.724	125.740	.000
切片	13.129	1	13.129	98.712	.000
card	316.914	3	105.638	794.232	.000
image	.335	4	.084	.630	.642
card * image	.512	12	.043	.321	.985
誤差	18.621	140	.133		
総和	349.512	160			
修正総和	336.382	159			

a. R2 乗 = .945 (調整済み R2 乗 = .937)

表 5-10：カードを要因とする多重比較（有彩色映像）

Tukey HSD

(I) card	(J) card	平均値の差 (I-J)	標準誤差	有意確率	95% 信頼区間	
					下限	上限
N1.5	N4	.2083	.08155	.056	-.0037	.4204
	N7	2.7183*	.08155	.000	2.5063	2.9304
	N9.5	3.0875*	.08155	.000	2.8755	3.2995
N4	N1.5	-.2083	.08155	.056	-.4204	.0037
	N7	2.5100*	.08155	.000	2.2980	2.7220
	N9.5	2.8792*	.08155	.000	2.6671	3.0912
N7	N1.5	-2.7183*	.08155	.000	-2.9304	-2.5063

	N4	-2.5100*	.08155	.000	-2.7220	-2.2980
	N9.5	.3692*	.08155	.000	.1571	.5812
N9.5	N1.5	-3.0875*	.08155	.000	-3.2995	-2.8755
	N4	-2.8792*	.08155	.000	-3.0912	-2.6671
	N7	-.3692*	.08155	.000	-.5812	-.1571

観測平均値に基づいています。

誤差項は平均平方（誤差） = .133 です。

*. 平均値の差は 0

図 5-6 に有彩色映像を表示した場合の結果を示す。実験結果より、無彩色映像を表示した場合と同様、N1.5 と N4 のカードは隠しやすく、N7 と N9.5 のカードは隠しにくい傾向が見られた。

この結果についても、カードの色と映像の色を要因とする二元配置分散分析を行った。結果を表 5-9 に示す。分析の結果、カードの色による効果が 1% 有意であった。また、カードの色について多重比較を行った。結果を表 5-10 に示す。結果、N9.5 のカードは、N4 と N1.5 との間に有意差があった。N7 のカードでも同様に、N4 と N1.5 との間に有意差があった。N4 のカードは、N9.5 と N7 と N1.5 の全ての間で有意差があった。N1.5 のカードでも同様に、N9.5 と N7 と N4 の全ての間で有意差があった。一方、映像の色を要因とする差は統計的に認められず、カード別にみても映像の色の差による効果は確認されなかった。

5.1.4. 考察

カードの色が低明度の場合、映像によってカードを効果的に隠すことができた。実物体を映像で隠す場合、照明用プロジェクタが実物体に光を当てないような映像をレンダリングしている。暗闇で暗い色は目立たないので、被験者からカードは認識されにくかった。一方、カードの色が高明度の場合は、被験者にカードが認識されてしまった。また、この場合、映像の色の明度が低いほどカードを隠す効果が高かった。映像の色が明るいと、そこから発せられる光も明るくなる。したがって、映像から発せられる光が展示物の見え方に影響しているのではないかと考えられた。そこで、映像の光の影響を検証するために、カードの設置位置における照度を測定した。測定は、各映像について 3 回行った。測定結果の平均値を表 5-11 に示す。無彩色映像の照度値より、最も暗い映像 0.2 から段階的に照度値が高くなっていることが分かり、映像 1.0 の照度値は非常に高い。一方、有彩色映像の照度値は、それぞれの色で多少の差はあるものの、全体的に照度値は低い。映像からの光が強いほど、カードはその光を反射し、結果的に照明用プロジェクタでカードに光を当てているのと同じ展示環境になった。したがって、カードが映像の光を反射し、そのことがシーンの見え方に影響を及ぼすことが示された。

表 5-11 : CG 映像の照度値

	照度値(lx)		照度値(lx)
1.0	72.4	赤	8.5
0.8	36.3	黄	31.7
0.6	16.6	緑	6.7
0.4	5.7	青	16.6
0.2	1.1	紫	11.5

この現象を改善するためには、展示物の設置位置をスクリーンから遠ざけることが必要である。例えば、展示物をさらに後方に設置することで、展示物が受ける映像光はかなり弱くなり、見え方は改善される。しかし、虚像平面と展示物の焦点距離が離れ、正しい表現でシーンを見ることができず位置（スイートスポット）が非常に制限されてしまうので注意が必要である。また、スクリーン位置を下げるのも有効的な手段である。

この実験から、展示物の色の明度が見え方に大きな影響を与えることが示された。また、現状の実験装置は展示物が映像からの光を強く受けていることが明らかになった。展示空間の光環境は、映像の色の効果よりも強い。そこで、実験装置のスクリーン位置と実物体の設置位置を調整し、反射光の影響を改善した。図 5-8 に調節後のシステム構成を示す。

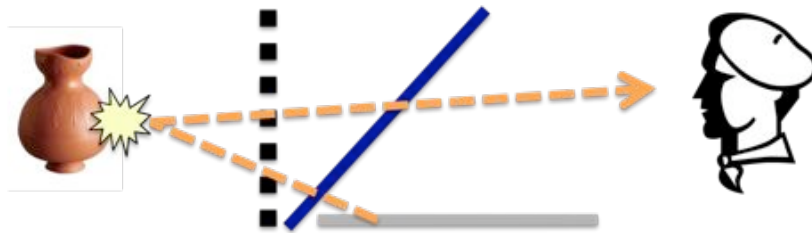


図 5-7 : 反射光の影響

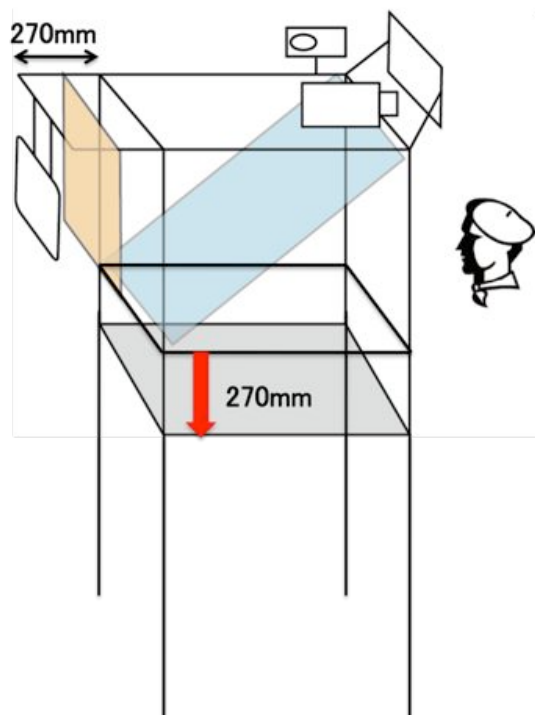


図 5-8 : 調整後のシステム構成

5.2. 色の組み合わせに関する実験

5.2.1. 概要

本実験では、展示物が色味と彩度を持つ有彩色の場合を想定し、重ね合わせる CG 映像の色によって見え方にどのような影響があるのかを検証する。また、効果的に隠すことができる色の組み合わせを明らかにする。

5.2.2. 実験方法

実験装置に展示物の代わりとして使用する実物体をハーフミラーの後方に設置し、実物体に照明を当てずに仮想映像を表示した状態で、実物体がどのように見えるのかを評価した。被験者は 10 名で、ここでは繰り返し実験を行わなかった。

A) 実物体

Hering の反対色説 (2.4 参照) に基づき、知覚的主要色である心理四原色の赤・黄・緑・青の色見本カードを用いた。トーンはビビットトーンを用いた。

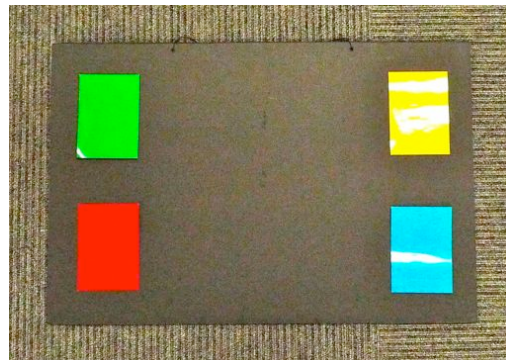


図 5-9 : カラーカードの配置

B) CG 映像

R (赤)・Y (黄)・G (緑)・B (青)・P (紫) の 5 色を用いた (表 5-3 参照)。20 秒毎に色が変わり、表示順はランダムとした。

C) 評価方法

表 5-12 の評価基準に基づき、カードの見え方を 5 段階で評価した。評価は、映像の色が変わる毎に全てのカードについて行った。

表 5-12 : 評価基準

点数	評価基準
2	カードが完全に見えない
1	カードがほとんど見えない
0	どちらでもない
-1	カードがやや見える
-2	カードが完全に見える

5.2.3. 結果

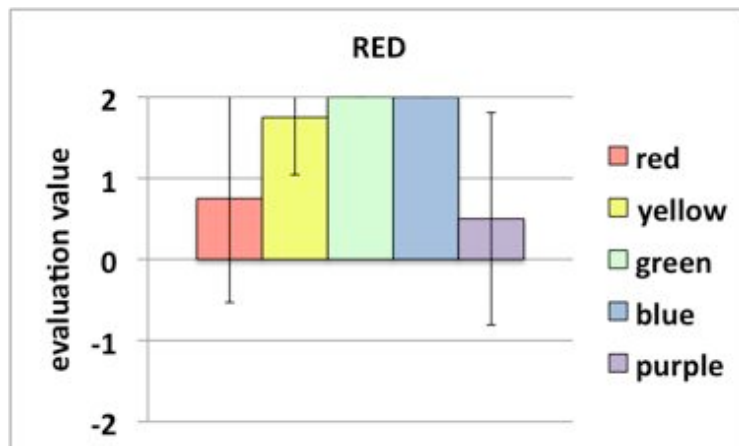


図 5-10 : 赤のカード結果

表 5-13 : 赤のカード分散分析結果

	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
グループ間	16.600	4	4.150	5.380	.002
グループ内	27.000	35	.771		
合計	43.600	39			

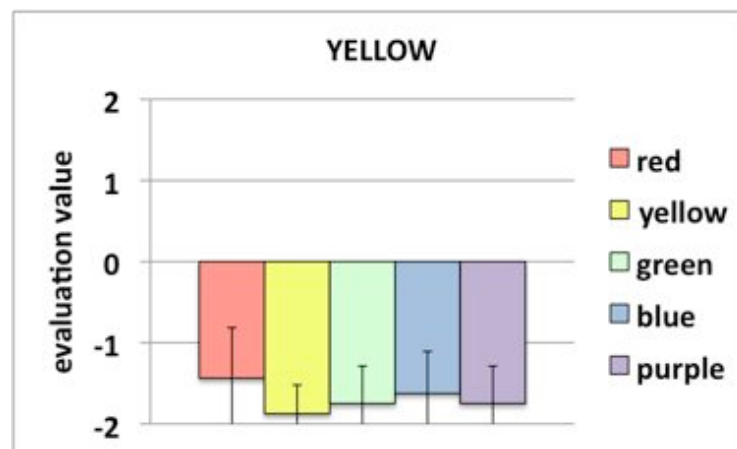


図 5-11 : 黄のカード結果

表 5-14 : 黄のカード分散分析結果

	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
グループ間	.875	4	.219	.904	.472
グループ内	8.469	35	.242		
合計	9.344	39			

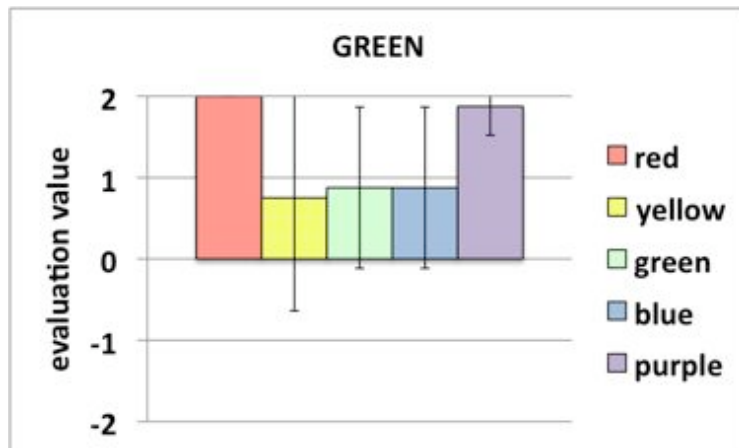


図 5-12 : 緑のカード結果

表 5-15 : 緑のカード分散分析結果

	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
グループ間	11.850	4	2.963	3.687	.013
グループ内	28.125	35	.804		
合計	39.975	39			

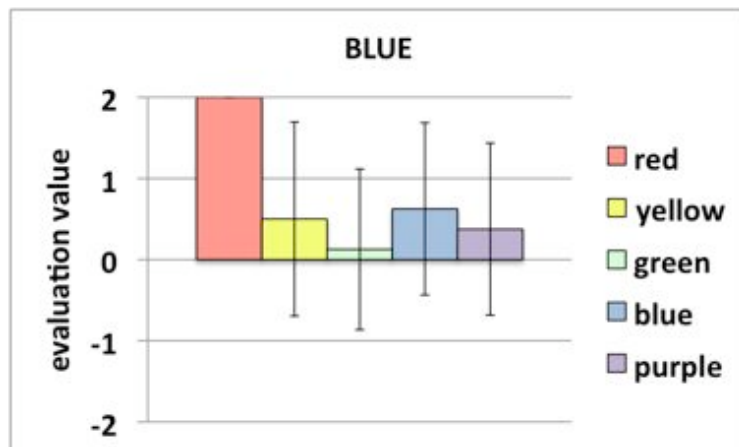


図 5-13 : 青のカード結果

表 5-16 : 青のカード分散分析結果

	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
グループ間	17.350	4	4.337	4.653	.004
グループ内	32.625	35	.932		
合計	49.975	39			

表 5-17：青のカードの多重比較結果

Dunnett T3

(I) image	(J) image	平均値の差 (I-J)	標準誤差	有意確率	95% 信頼区間	
					下限	上限
red	yellow	1.50000	.42258	.069	-.1078	3.1078
	green	1.87500*	.35038	.008	.5419	3.2081
	blue	1.37500	.37500	.059	-.0518	2.8018
	purple	1.62500*	.37500	.026	.1982	3.0518
yellow	red	-1.50000	.42258	.069	-3.1078	.1078
	green	.37500	.54894	.998	-1.4243	2.1743
	blue	-.12500	.56497	1.000	-1.9711	1.7211
	purple	.12500	.56497	1.000	-1.7211	1.9711
green	red	-1.87500*	.35038	.008	-3.2081	-.5419
	yellow	-.37500	.54894	.998	-2.1743	1.4243
	blue	-.50000	.51322	.972	-2.1745	1.1745
	purple	-.25000	.51322	1.000	-1.9245	1.4245
blue	red	-1.37500	.37500	.059	-2.8018	.0518
	yellow	.12500	.56497	1.000	-1.7211	1.9711
	green	.50000	.51322	.972	-1.1745	2.1745
	purple	.25000	.53033	1.000	-1.4791	1.9791
purple	red	-1.62500*	.37500	.026	-3.0518	-.1982
	yellow	-.12500	.56497	1.000	-1.9711	1.7211
	green	.25000	.51322	1.000	-1.4245	1.9245
	blue	-.25000	.53033	1.000	-1.9791	1.4791

*. 平均値の差は 0.05 水準で有意です。

図 5-10 に赤のカードの実験結果を示す。縦軸が評価値を示し、値が大きいほどカードを隠す効果が高い。棒グラフの色は CG 映像の色と対応しており、エラーバーは標準偏差を示す。結果より、緑と青の映像のときカードは被験者に認識されなかった。また、CG 映像の色を要因とする一元配置分散分析を行った。結果を表 5-13 に示す。分析結果より、映像の色を要因とする効果が 1% 有意であった。その後、多重比較による検定を行ったが、それぞれの映像の間で有意差はなかった。次に、黄のカードについて述べる。実験結果を図 5-11、分散分析結果を表 5-14 に示す。結果より、どの映像でもカードを隠すことができなかった。また、分散分析の結果、映像の色の効果は有意ではなかった。緑のカードについて、実験結果を図 5-12、分散分析結果を表 5-15 に示す。結果より、赤の映像のときカードは被験者に認識されなかった。次いで、紫の映像もカードを隠す効果が高かった。分散分析の結果、映像の色を要因とする効果が 1% 有意であった。その後、多重比較による検定を行ったが、それぞれの映像の間で有意差は確認されなかった。最後に、青のカードについての実験結果を図 5-13、分散分析結果を表 5-16 に示す。結果より、赤の映像のときカード

は被験者に認識されなかった。分散分析の結果、映像の色を要因とする効果が1%有意であった。その後の多重比較による検定を行った。結果を表5-17に示す。赤と黄の映像の間で10%有意、赤と緑の映像の間では1%有意、赤の映像と青の映像の間で10%有意、赤の映像と紫の映像の間で5%有意で差が認められた。

5.2.4. 考察

実験結果より、赤、緑、青のカードにおいて、色合成の明らかな効果が認められた。

まず、赤のカードと緑のカードについて述べる。これら2枚のカードは補色の関係にある。本実験では、赤のカードにおいても、緑のカードにおいても、映像の色間で有意差が認められなかった。しかし、赤のカードにおいては緑の映像で、緑のカードについては赤の映像で、完全にカードが映像によって隠れていると被験者全員が評価した。この要因として、カードと映像の色が減法混色の原理に基づいて合成されたと考えられる。加法混色が色光同士の混合を扱うのに対し、減法混色は光と物質の相互作用を扱うものである。減法混色のメカニズムは、次のようになる。光源からの光がカラーフィルターのような物体を透過するとき、物体は光の一部を吸収する。このとき、物体色の補色成分が吸収され、それ以外の部分の光を物体色として透過する。この原理に基づくと、カードの色を光源、虚像の色をカラーフィルターに置き換えることができる。カードの色が虚像を透過するとき、補色成分であるカードの色が虚像によって吸収される。しかし、カードの色は虚像の色と補色関係にあるのでカードの色は全て吸収される。したがって、カードの色は虚像を透過するときに完全に打ち消され、被験者まで届かなかった。また、赤のカードと青の映像、緑のカードと紫の映像の組み合わせでも、効果的にカードを隠すことができた。この2色は補色関係ではないが、隣接補色であるためほとんどの成分が虚像によって吸収され、カードを効果的に隠すことができたと考えられる。一方、カードと映像が同系色の場合、カードを隠すことができなかった。これは、カードの色が虚像に吸収されることなく全て透過してしまうために、カードの部分だけ明るく浮かび上がって見えたと考えられる。この場合、背景色をカードの色に近づけて、背景とカードとのコントラストをなくすことによって、見え方の改善が期待できる。

次に、青のカードについて述べる。赤のカードと緑のカードのように、減法混色による色合成がなされていると考えると、補色関係にある黄の映像で効果的にカードが隠せるはずである。しかし、隣接補色である赤の映像のときだけ、カードを効果的に隠すことができた。これは、色の明度バランスが影響した可能性がある。実物体の色カードは、ビビッドトーンが使用された。図5-15にビビッドトーンの各色相の明度を示す。図より、赤、緑、青の3色と比較して、黄は非常に高明度であることが分かる。赤と緑のように、明度値が同じレベルの補色関係にある2色は、虚像によってカードの色を打ち消すことができたが、黄と青のように補色関係にあっても明度値に大きな差がある組み合わせでは、吸収と透過のバランスが崩れ、カードを隠すことができなかったと考えられる。したがって、青のカードを黄の映像で隠す場合には、黄色の明度を青と同じレベルまで抑えることで効果が見られる可能性がある。これを検証するために、青(N4)のカードに対して黄の同系色であるうぐいす色(N6)を投影して、見え方を確認した。結果、同系色である黄のカード以外は効果的に隠すことができた。

最後に黄のカードについて述べる。黄のカードでは、映像の色に関係なくカードを隠すことができなかった。これは、先に行われた実験から、色の明度の影響が大きいと考えら

れる。高明度なカードは、色合成効果 によって隠すことが難しく、別のアプローチが必要である。そこで、次章では視点誘導効果についての評価実験を行う。

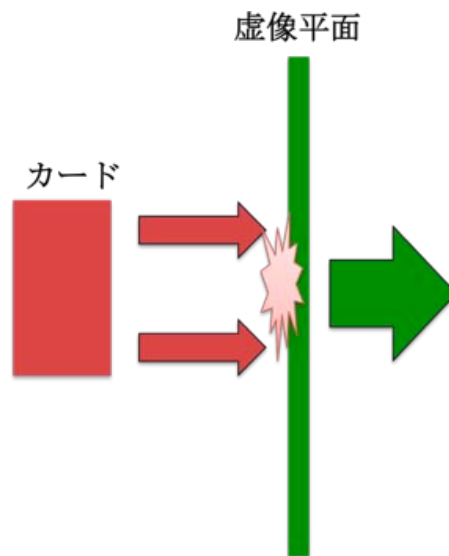


図 5-14：補色成分の吸収

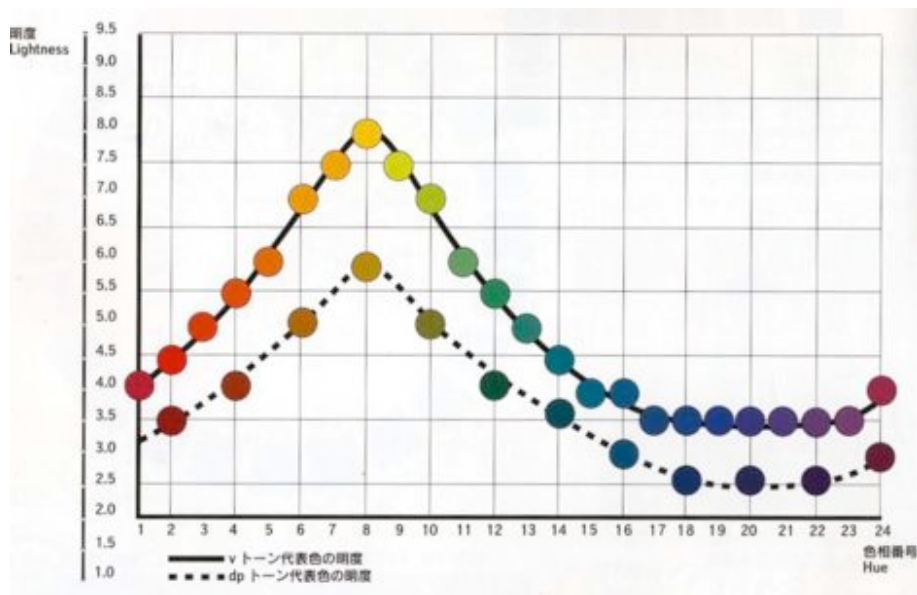


図 5-15：V トーンの各色相の明度差 18

18 大井義雄, 川崎秀昭『色彩』日本色研事業株式会社, 1996年, pp14.

第6章 アニメーションによる視点誘導効果に関する実験

6.1. アニメーション効果に関する実験

6.1.1. 概要

色合成効果には限界がある。そこで、アニメーションによってユーザの視点を誘導することで、結果的にシーンの見え方を向上する効果があるのではないかと考えた。

本実験では、静止画と動画による比較実験を行い、アニメーションによる視点誘導効果を検証する。

6.1.2. 実験方法

実験装置に展示物の代わりとして使用する実物体をハーフミラーの後方 400mm の位置に設置し、被験者は投影された CG 映像を見る。そのとき、実物体がどのように見えたかを評価する。被験者は 10 名で、被験者 1 人につき 3 回繰り返し実験を行った。

A) 実物体

明度値の異なる 4 枚の色見本カードを用いた。(表 5-1 を参照。)

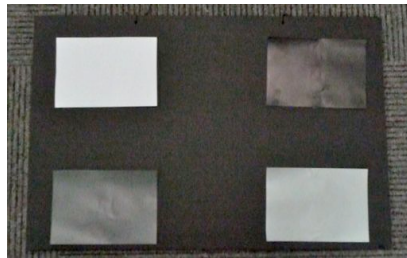


図 6-1 : カードの配置例

B) CG 映像

3D で描画された様々なサイズの白い球体をランダムに配置した映像を用いた。背景色は赤・黄・緑・青・紫の 5 主要色 (表 5-3 参照) を用い、1.5 秒毎に色をランダムに変化させた。以上を基本として、静止画と原点を中心に球体が全体的に回転するものの 2 種類を用いた。

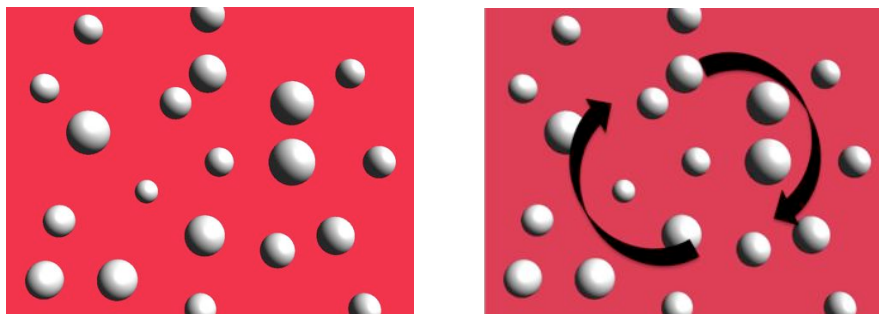


図 6-2 : 静止画 (左) と動画 (右)

C) 評価方法

表 6-1 に示す評価基準に基づき、カードの見え方を点数で評価した。評価は、映像の色が変わる毎に全てのカードについて行った。

表 6-1 : 評価基準

点数	評価基準
0 (min)	映像を見ていて、カードが気にならない。
10 (max)	映像を見ていて、カードが邪魔である。

6.1.3. 結果

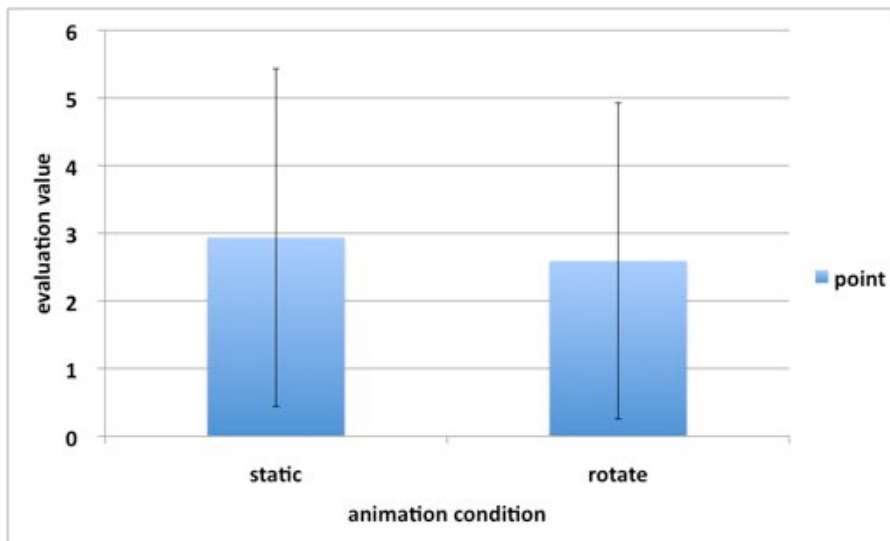


図 6-3 : アニメーション効果に関する実験結果

表 6-2 : 三元配置分散分析結果

ソース	タイプ III 平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
修正モデル	2233.284 ^a	39	57.264	19.321	.000
切片	3054.404	1	3054.404	1030.561	.000
animation	12.018	1	12.018	4.055	.045
background	4.062	4	1.016	.343	.849
card	2208.896	3	736.299	248.428	.000
animation * background	.632	4	.158	.053	.995
animation * card	4.522	3	1.507	.509	.677
background * card	2.204	12	.184	.062	1.000
animation * background * card	.950	12	.079	.027	1.000
誤差	1066.978	360	2.964		
総和	6354.667	400			
修正総和	3300.262	399			

a. R2 乗 = .677 (調整済み R2 乗 = .642)

実験結果を図 6-3 に示す。グラフは、横軸がアニメーションの種類を示し、縦軸はカードが気になった度合いを表している。実験の結果、動画の方がわずかながら評価値が低下した。この実験結果をもとに、アニメーション、カードの色、背景色を要因とする三元配置分散分析を行った。分散分析の結果を表 6-2 に示す。分析の結果、カードの色を要因とする効果が 1%有意、アニメーションを要因とする効果が 5%有意という結果が得られた。しかし、背景色の影響と交互作用は確認されなかった。

6.1.4. 考察

分析結果より、アニメーションはシーンの見え方に明らかな影響を与え、カードへの注意を逸らす傾向があることが示された。この要因として、まず、球体が何度もカードの上を通過したので、カードの形状が認識されにくくなったことが考えられる。また、アニメーションによって虚像の後ろに設置されたカードではなく仮想空間に被験者の焦点が向けられたことが考えられる。

この実験から、アニメーションがシーンの見え方に及ぼす影響が検出された。しかし、アニメーションにはさまざまな種類がある。今回のアニメーションには、ランダム性はなく、物体の大きさ変化は含まなかった。アニメーションの種類によっては、さらに効果的に視点誘導できる可能性がある。そこで、次の実験では、どのような動きによって効果的に視点誘導が可能かを検証することにした。

6.2. アニメーションの種類に関する実験

6.2.1. 概要

前の実験から、アニメーションがシーンの見え方に影響を与えることが示された。さらに、本実験では、アニメーションの種類によってシーンの見え方に差があるのかを検証した。

6.2.2. 実験方法

実験装置に展示物の代わりとして使用する実物体をハーフミラーの後方に設置して、被験者は投影された CG 映像を見る。そのとき、実物体がどのように見えたかを評価した。被験者は 10 名で、繰り返しは行わなかった。なお、本実験は図 5-8 に示した調整後の実験装置を用いて行われた。

A) 実物体

白 (N9.5) の色見本を用いた。

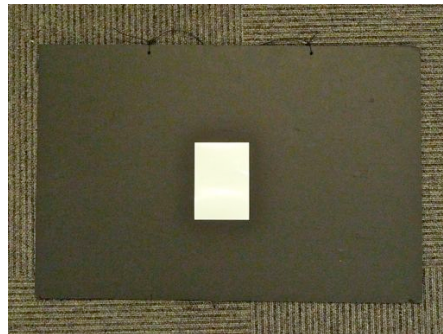


図 6-4 : 実物体の配置

B) CG 映像

3D で描写された 1 つの白い球体が任意の方向へ移動し、画面の端までくると跳ね返るアニメーションを用いた。球体の大きさは OpenGL 上で定義し、基本サイズを 0.5 とした。背景色は赤・黄・緑・青・紫の 5 主要色 (表 5-3 参照) で、10 秒毎に色が変わり、表示順はランダムとした。球体の移動速度は、跳ね返り数が約 2 回 /sec になるようにした。これを基本のアニメーションとし、以下の 2 つのコンテンツを使用した。

① 基本のアニメーションのみ

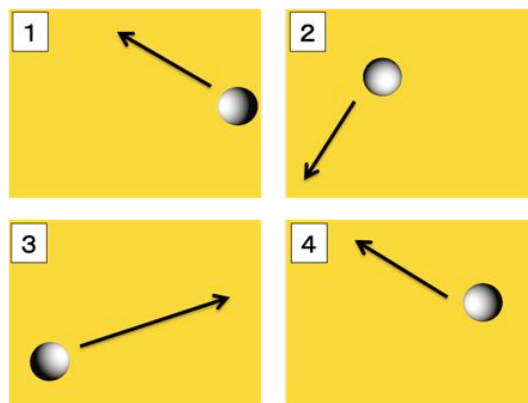


図 6-5 : non-zoom

② 基本のアニメーションにズーム機能（物体の大きさ変化）をつけたもの

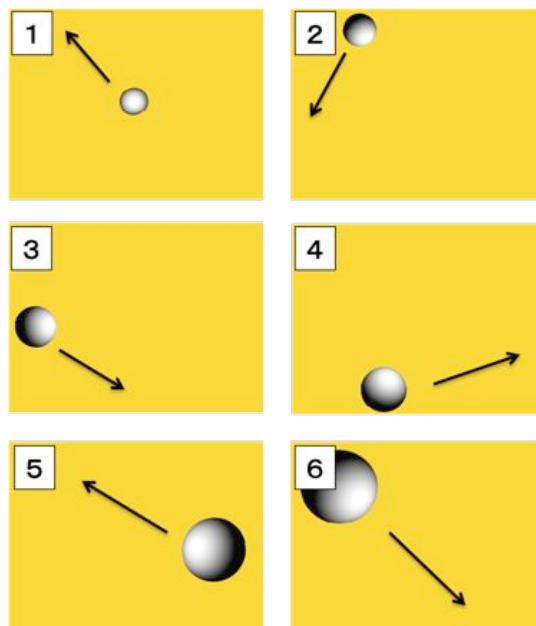


図 6-6 : zoom

球体サイズは最小を 0.4、最大を 1.2 とした。なお、球体の大きさの変化速度は、背景色が変わる 10 秒の間で最小から最大になり、再び最小に戻る一連の流れが完了するように設定した。

C) 評価方法

評価基準（静止画）を提示し、このときの映像の見え方を基準点（10 点）に設定する。次に、実験コンテンツ（動画）を投影し、基準の見え方に対して、カードがどの程度気になったか（邪魔に感じたか）を評価した。評価は、映像の色が変わる毎に行った。

[1] 評価基準の静止画

評価基準の静止画として、3D の白い球体が中央付近に描画されたものを用いた。このとき、背景色は色合成実験で最も展示物を隠す効果が低かった黄色を使用した。

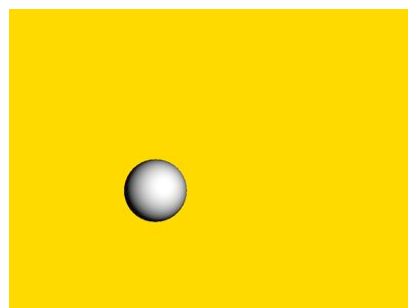


図 6-7 : 評価基準の映像

6.2.3. 結果

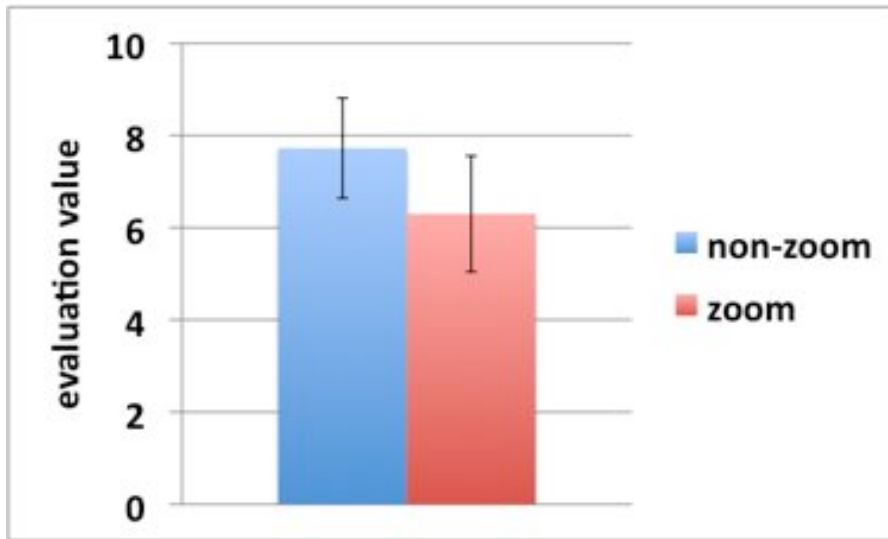


図 6-8：アニメーションの種類に関する実験結果

表 6-3：二元配置分散分析結果

ソース	タイプ III 平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
修正モデル	129.112 ^a	9	14.346	3.159	.003
切片	3934.013	1	3934.013	866.318	.000
animation	40.613	1	40.613	8.943	.004
background	78.675	4	19.669	4.331	.003
animation * background	9.825	4	2.456	.541	.706
誤差	317.875	70	4.541		
総和	4381.000	80			
修正総和	446.987	79			

a. R2 乗 = .289 (調整済み R2 乗 = .197)

図 6-8 に実験結果を示す。縦軸はカードが気になった度合いを示し、値が低いほど視点誘導効果によってカードが気にならなくなったことを示している。評価軸の上限が基準値の 10 点で、青のグラフが基本アニメーションのみ、赤のグラフが物体の大きさを変化させたものの平均値で、エラーバーは標準偏差を示している。

実験の結果、どちらの実験コンテンツも基準点より評価値が低かった。これらの結果をもとに、アニメーションと背景色を要因とする二元配置分散分析を行った。表 6-3 に分析結果を示す。結果、アニメーションを要因とする効果と背景色を要因とする効果がともに 1% 有意であった。また、2 つの実験コンテンツについて t 検定による分析を行った。結果、2 つのコンテンツの間に 1% の水準で有意差があった ($t=2.792$, $df=78$, $p<.01$)。

6.2.4. 考察

映像にアニメーションをつけることによって、カードへの注意を逸らすことができ、アニメーションの種類によってシーンの見え方に差があることが明らかになった。また、球体が大きさ変化を伴わずに平面的に移動する場合と、球体の大きさが変化しながら移動する場合を比較すると、後者の方がカードを目立たなくさせ、シーンの見え方を向上する効果が高いことが示された。物体の大きさを変化させることで、被験者の視点は仮想世界の左右上下だけでなく、手前や奥にも誘導された。その結果、カードと焦点距離の異なる仮想物体へと焦点が向けられ、カードへの注意が逸れやすかったと考えられる。本実験では、カードの位置を考慮したアニメーションではなく、ランダムに移動させたコンテンツを用いた。しかし、実際の展示では、展示物の位置を考慮したアニメーションを設定し、意図的に視点をコントロールすることが可能であり、さらに視点誘導の効果は期待できる。視点誘導は、解説などを表示して文字を読ませることで可能である。また、評価実験全体を通して、見る人の心理的な作用が見え方に与える影響が非常に大きいことが示唆された。カードの存在をあらかじめ知っている場合と知らない場合とで、シーンの印象は大きく異なった。実験では、評価を行う関係で、カードの存在をあらかじめ被験者に知らせる必要があったが、実験説明の前ではカードの存在に気づかない人が多かった。

前章と本章の実験より、AR展示システムにおける効果的なコンテンツ制作のための指標として、以下のことが明らかになった。

まず、色合成効果に関して、展示物の色の明度がシーンの見え方に大きな影響を与えた。そして、展示物の明度と映像光の明るさの関係が見え方を大きく左右する。特に、展示物の色が高明度の場合、映像は低明度の色を用いて、映像の発する光を弱くする必要がある。

次に、視点誘導効果に関して、映像にアニメーションをつけることで、鑑賞者の注意を見るべき位置へ誘導する効果があることが示された。また、仮想物体だけを平面的に動かすのではなく、カメラ位置や物体の大きさを変化させるなどして視点を移動することで、展示物から映像に焦点が向けられ、結果的にシーンの見え方を向上できる。

第6章 システム評価

6.1. デモ展示の目的

本研究では、システム評価を行うために、実際の博物館でのデモ展示を実施した。本章では、我々が提案した展示手法によって雰囲気表現をすることができたか、そしてそれが来館者ニーズへの解につながったかを評価する。なお、今回のデモ展示は、日本科学未来館で2010年10月14から17日に行われた『ASIAGRAPH 2010』で実施され、このシステムで展示を見た人に対してアンケートをお願いした。

6.2. システム概要

展示システムとして、実験装置に超指向性スピーカー H450（丸紅情報システムズ）を取り付けた。図 6-1 に展示ブースでの配置を示す。展示ブースでは、来館者にスイートスポットの位置が直感的に分かるように足形をつけた。足形の位置に立った人は、超指向性スピーカーからの音を聞きながら、展示物と映像とを正しい位置関係で見ることができる。鑑賞者の右側には、空間型 AR 展示システムの見え方の原理や展示コンテンツについて簡単に説明したパネルを用意した。



図 6-1：展示ブースでの配置

展示物とスクリーンの設置位置は、実物の展示物と仮想の展示物の大きさを考慮して調整された。展示物は、300×500mmで、LED プロジェクタで全面に照明を当てるためには、ハーフミラーの後方400mmの位置に設置する必要がある。そこでまず展示物を固定し、次に実物と虚像の大きさが一致する投影サイズになるところをスクリーン位置とした。図 6-2 に展示物とスクリーンの位置関係を示す。

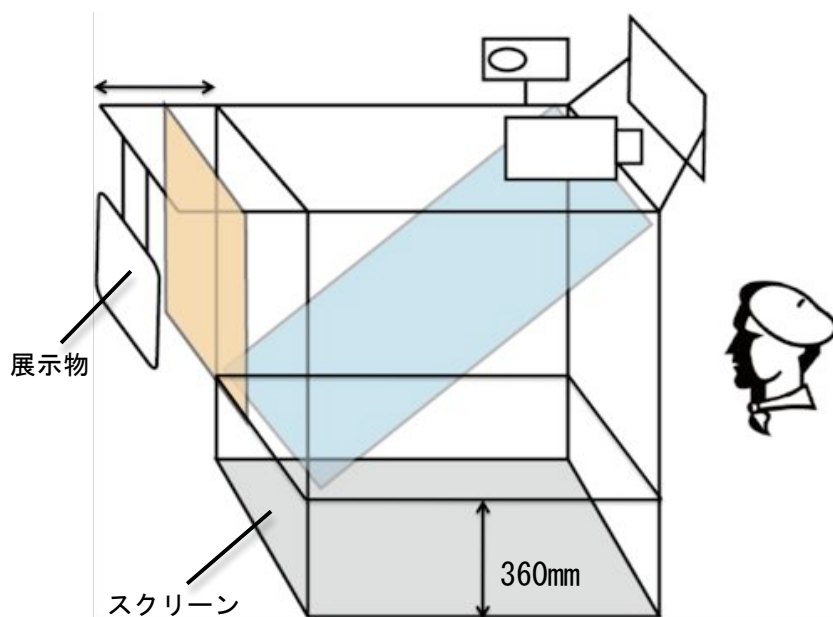


図 6-2 : 展示物とスクリーンの位置関係

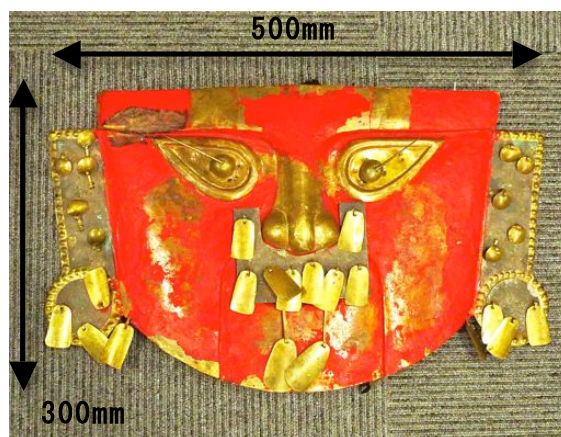


図 6-3 : 展示物の外観

6.2.1. 超指向性スピーカー

超指向性スピーカーは、音を光線のように一方方向に送ることができ、意図した場所にだけ音を届けることが可能になる。今回、デモ展示 に超指向性スピーカーを利用した理由は2つある。

1つめは、鑑賞者を効果的にスイートスポットへ誘導するためである。この展示システムでは、展示物と映像との正しい融合表現が見られる位置、スイートスポットが限られている。そこで、スピーカーの位置や向きを調整してそのエリアだけに音を届けることにした。そうすることで、音が聞こえにくい位置から展示を見ている人は、音の聞こえるエリアへと無意識に移動し、効果的にスイートスポットへ誘導できると考えた。今回のデモ展示のように1人用のシステムでは足形による誘導も有効であるが、この手法によって大型の展示システムにも対応可能になる。2つめは、他の展示を邪魔することなく、展示を見ている人にだけ音を届けられるからである。博物館では、1つの展示空間に複数展示されているのが一般的である。そこで、超指向性スピーカーを用いれば、同じ空間で同時に、異なる音を表現することができる。

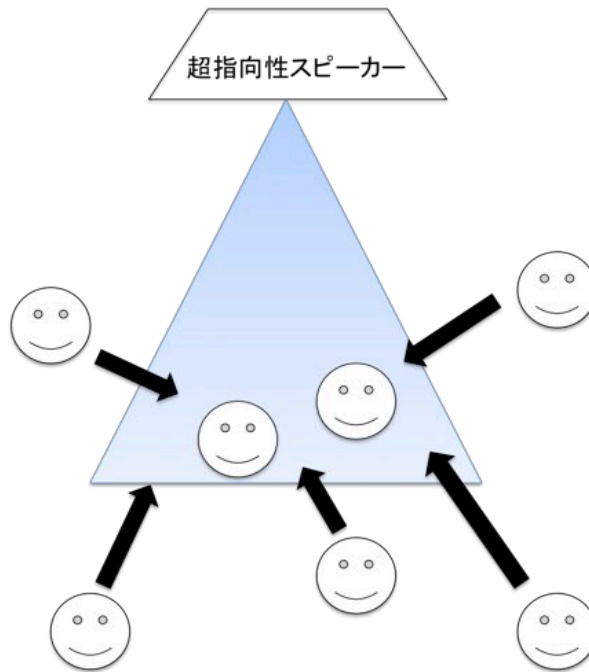
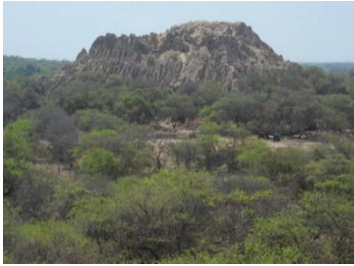





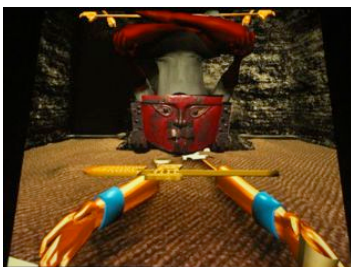
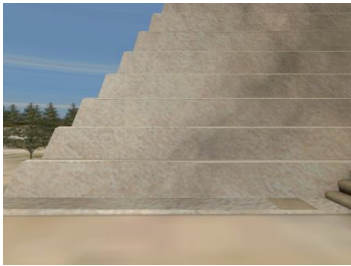
図 6-4 : 超指向性スピーカーによるスイートスポットへの誘導

6.3. 展示コンテンツ

デモ展示では、シカン文化を代表する埋蔵品の1つである黄金のマスク（レプリカ）を展示し、雰囲気として発掘現場の様子を表現した。前半はマスクが発掘されたロロ神殿全体の様子、後半はロロ神殿の内部（東の墓）に潜り込み、マスクが埋まっていた地点の様子を表現した。なお、この展示コンテンツは、2009年に日本科学博物館で開催された『黄金の都 シカン』[23]において、実際に3Dシアターで上映されたものを応用して制作した。

制作にあたり、5章と6章の実験から得られた知見を活かした。今回の展示物は、図6-3に示したように赤色である。赤は緑と青の映像で効果的に隠すことができるため、緑を使った木々や青を使った空を使って、効果的にマスクを隠した。また、土の色は黄色ではなく、ややくすんだ黄土色を使った。また、マスクの一部には金属が使われており、それが映像の光を反射して、CG映像で隠すことが難しい部分があった。そこで、ウォークスルーなどのアニメーションによって、視点誘導効果を高めた。

映像	手法	ナレーション
		<p>【シカン文化の説明】 シカン文化は、9世紀から14世紀にかけてペルー北部海岸で栄えました。</p>
	<p>現在のロロ神殿の写真から3DCG映像で表現された当時の映像にフェードイン/フェードアウトで変化する。</p>	
		<p>このロロ神殿は、シカン文化の代表的な遺跡の1つです。</p>
	<p>ウォークスルーの視点移動で神殿に近づき、東の墓の入口付近へ移動する。</p>	<p>【東の墓の説明】 1991年から92年にかけて、ロロ神殿の東の墓の発掘が行われました。</p>



ブラックアウトし、墓内部（地下）へ移動する。

ウォークスルーで墓内部を移動しながら、仮面の正面で停止する。

CG 映像の仮想マスク部分が黒く変化すると同時に、照明制御によって実物に照明を当てて、実物を仮想世界に融合する。

【墓内部の説明】

東の墓は地下 12m に達し、墓室からは 5 体の遺体とたくさんの副葬品が発見されました。

中でも、中央に埋葬されていた貴族の遺体は、上下逆さまに置かれ、切り離されたその顔には、シカンの神をかたどった黄金の仮面が着けられていました。


	<p>CG 映像を全て消して、実物だけを展示する。</p>	<p>それでは、黄金の仮面をご覧ください。</p>
---	-------------------------------	---------------------------

図 6-5 : 展示コンテンツのシナリオ

6.4. アンケート項目

システム評価を行うために、アンケート項目を検討した。

まず、システムの有効性については、違和感なく展示を体験できたかを評価する必要がある。そこで、「CG 映像と展示物を正しく融合できているか」という質問を設定した。次に、システムの妥当性については、展示物の理解のしやすさと新たな興味・関心の発掘といった点を評価する。そこで、「シカン文化の雰囲気（発掘現場の様子）を理解することができたか」と「これまでの展示手法に比べて、展示物への興味や関心が 持てるか」という質問を設定した。最後に、「展示物を理解するために雰囲気は重要か」と「実際の博物館でこの手法を取り入れた方がいいか」という質問も設定し、本提案の妥当性を確認した。図 6-6 に実際に配布したアンケートを示す。

アンケートにご協力をお願いします。

※あてはまるところに○をつけて下さい。



☆性別と年齢をお答え下さい。

【性別】 男 ・ 女

【年齢】

20歳以下 20歳代～40歳代

40歳代～60歳代 60歳以上

☆CG映像と展示物が正しく融合できていると思えましたか？

すごく思う 思う どちらでもない 思わない 全然思わない

☆展示物を理解するうえで、当時の雰囲気(実際に使われていた時の様子など)は重要だと思えますか？

すごく思う 思う どちらでもない 思わない 全然思わない

☆シカン文化の雰囲気(発掘現場の様子)が伝わりましたか？

すごく思う 思う どちらでもない 思わない 全然思わない

☆モノだけの展示より、CG映像と展示物を一緒に見た方が展示物への興味や関心がわきますか？

すごく思う 思う どちらでもない 思わない 全然思わない

☆実際の博物館展示で、この手法を取り入れた方がいいと思えますか？

すごく思う 思う どちらでもない 思わない 全然思わない

ご協力、ありがとうございました。

図 6-6 : アンケート用紙

6.5. アンケート結果

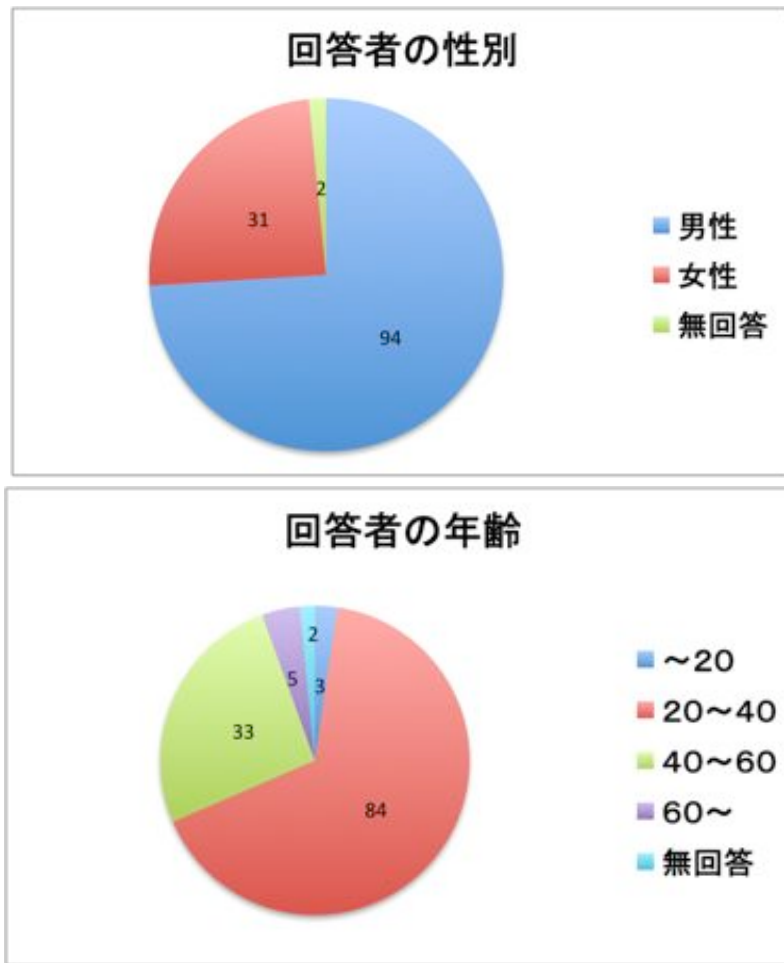


図 6-7 : 回答者の属性

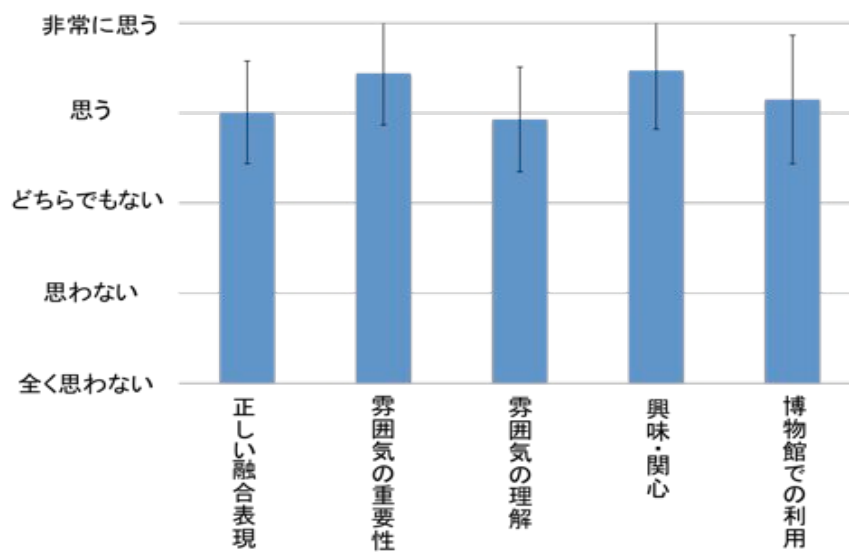


図 6-8 : アンケート結果

図 6-7 に回答者の属性、図 6-8 にアンケート結果を示す。4 日間のデモ展示を通して、1000 名以上の人に空間型 AR 展示を体験してもらうことができた。また、そのうち 127 名からアンケートの回答を得ることができた。回答者の約 7 割が男性で、残りの 3 割が女性であった。また、年齢は 20 代～40 代が約 7 割と最も多かった。

結果は次のようになった。まず、CG 映像と展示物が正しく融合されていたかという質問については平均値 4.01（標準偏差 0.57）であった。次に、展示物を理解するうえで、当時の雰囲気は重要かという質問については平均値 4.44（標準偏差 0.57）であった。そして、シカン文化の雰囲気（発掘現場の様子）が伝わったかという質問については平均値 3.93（標準偏差 0.58）であった。また、モノだけより、CG 映像と展示物を一緒に見た方が展示物への興味・関心がわくかという質問については平均値 4.47（標準偏差 0.65）であった。最後に、実際の博物館展示でこの手法が取り入れられた方がいいかという質問については、平均値 4.15（標準偏差 0.71）であった。

図 6-9 に展示システム、図 6-10 にデモ展示の様子を示す。



図 6-9 : 展示システム



図 6-10：デモ展示の様子

6.6. 考察

システムの有用性評価である「CG映像と展示物の正しい融合表現」について、比較的高い評価が得られた。鑑賞者に違和感を与えることなく、効果的な雰囲気を作成するために、展示空間の光条件を考慮してスクリーン位置やマスクの設置位置を調節し、展示物を効果的に隠すことができる色を用いてコンテンツを制作した。また、アニメーションによってたえず視点移動の動きを加えて静止状態を少なくした。これらによって、正しく効果的な表現ができたと考えられる。しかし、見るポイントによっては映像とマスクの位置に微妙なズレが生じてしまったため、やや低い評価をつける人もいた。これは、展示物の設置位置と虚像平面の焦点距離に差があったからである。黄金のマスクは、プロットタイプを用いて展示するにはやや大きく、さらに一部に金属を使用しているため映像光を反射しやすい。そこで、展示物をなるべくスクリーンから遠ざける必要があった。したがって、展示物は虚像平面よりもやや後方に設置され、スポットが制限されてしまった。これは焦点距離を一致させることで改善でき、システムの拡張や位置調整によって解決可能な問題である。

システムの妥当性評価である「雰囲気理解」については、他の質問と比較して評価値が低い。要因として、2つ考えられる。まず、本研究で想定してあるシステムは大型の展示システムだったが、今回の展示会場には設置が難しく、プロットタイプでの展示になったことである。また、今回の展示コンテンツに生きた人物が登場しなかったことである。雰囲気とは、その場にいる人々の動きによって生成される部分が大きく、その場にいる感覚を与えるには、CG映像によって広範囲に鑑賞者の視野をカバーする必要がある。「新しい興味・関心へのきっかけ」については、非常に高い評価を得ることができた。展示物をCG

映像によって隠し、発掘現場を探検しながら最終的に本物の展示物が出現する、といった一見手品のような見せ方が、展示物に関心を持つきっかけにつながったと考えられる。

最後に、本提案の妥当性について考察する。「雰囲気的重要性」について高い評価を得ていることから、展示物の周囲の雰囲気を表現することによって鑑賞者の理解を助け、彼らの満足度の向上につながると期待できる。「実際の博物館での使用」についても高い評価を得たものの、展示コンテンツを懸念するコメントもいくつかあった。また、もっと近くで展示物を見たいといった感想もあった。博物館では、実際に本物を見ることが最も重要な行為であり、伝えたい背景情報に適した表現手法やストーリーを慎重に議論し、展示手法を決定していくことが重要である。

第7章 空間型 AR 展示システムの展望

空間型 AR 展示システムの展望として、新たに様々な要素を加えることでより効果的に雰囲気な雰囲気表現が実現できる。我々の研究グループでは、賑わい感と音に関する研究もなされた。本章では、これら 2 つの要素についてなされた研究を紹介する。

賑わい感について、無人のコンテンツに人物を入れて、彼らの動きから生成される雰囲気の表現を目指した。デモ展示で使用したコンテンツでは、生きた人物は登場していない。そのため、人の動きから生じる賑わいは感じられなかった。また、現在の展示コンテンツは、当時の建築物や遺跡の様子を細部まで再現したものは多くあるものの、当時の人物を入れた表現はあまりない。そこで、当時の人物の体格や服装も正確に再現し、仮想世界に登場させる。そして、等身大のサイズで投影して、鑑賞者に自分自身も群衆の中にいるかのような感覚を与えることができる。図 7-1 と図 7-2 に実際に制作したコンテンツのワンシーンを示す。



図 7-1：熊本城の様子



図 7-2：参勤交代の様子

また、雰囲気表現においては聴覚刺激も有効に働く。例えば、仮想人物がその国の言語や当時の方言で話をしている会話や足音などの背景音を再現する。これは、映像制作の分野では「ギャ」と呼ばれ、場の空気を表現する有効的な手法として用いられてきた。そこで、本提案の中では、江戸に向かう武士たちの会話によって期待感や緊張感、ざわつきを表現した。また、参勤交代の行列の足音やかけ声によって、その場独特の空気を表現した。図 7-3 にギャ音収録の様子を示す。

また、この展示システムは、ビデオアバタを介したギャラリートークにも応用可能性がある。場の雰囲気の展示を目指す場合、実物だけでなく、現地との空間共有が望まれる。そこで、現地と博物館とをネットワークで結び拡張現実空間を共有し、現地の専門家によるギャラリートークを行う。図 7-4 にビデオアバタによるギャラリートークの例を示す。この空間共有技術で現場と博物館をつなぐことで、開かれたミュージアムとなり、利用方法の拡大が期待される。



図 7-3 : ギャ音収録の様子



図 7-4 : ギャラリートークの例

第8章 結論

本研究では、デジタルミュージアム実現に向けて、雰囲気伝える空間型 AR 展示システムを提案した。空間型 AR シアター方式による手法によって大画面で仮想世界を表示し、仮想世界を実物に融合することで雰囲気を表現する。展示物を仮想映像によって完全に隠したり、仮想世界と融合したりすることによって、モノと一緒に雰囲気を鑑賞者に伝達する。この場合、展示物を隠す効果は一定ではなく、シーンの見え方は不安定であった。また、展示物を効果的に隠すことができるようなコンテンツ制作のための明確な指標が存在していなかった。そこで、展示物と仮想映像の色の組み合わせに着目し、効果的に展示物を隠すことができる色の組み合わせを検証した。しかし、展示物の色や素材によっては、それ隠すことが非常に困難な場合がある。加えて、展示物は複数の色からなる場合がほとんどである。そこで、アニメーションによる視点誘導効果が見え方に及ぼす影響も検証した。また、実用性の高いシステム構築のために、汎用のモデリングソフトによる AR 展示システムのコンテンツ制作手法を提案した。

結果、展示物の色の明度がシーンの見え方に大きく影響することが明らかになった。また、映像光の強さの方が見え方に大きな影響を与えていたことが示された。視点誘導に関して、コンテンツにアニメーションをつけることで鑑賞者の視点を意図的に誘導することができ、シーンの見え方の向上につながることを示唆された。最終的に、これらの結果をもとに展示コンテンツを制作し、実際の博物館でデモ展示を実施した。また、アンケートによるシステム評価を行った。結果、空間型 AR 展示手法による雰囲気表現の有効性が示された。

今後の課題として、焦点距離と見え方の影響を検証する必要がある。視点誘導効果に関する実験より、動く仮想物体にユーザの視点が誘導されるとともに、虚像平面と実物体との焦点距離が異なったために、さらにその効果が高まった可能性が示唆された。焦点距離が見え方に及ぼす影響を明らかにすることができれば、さらに効果的な表現につながる可能性がある。また、実用化のためには大型の展示システムを用いたシステム評価が必要となる。その際には、一般の人だけではなく運営や企画、その分野の学者の方たちの評価も含んだ総合的な検証が必要である。

謝辞

本論文の執筆にあたり、慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科の小木哲朗教授、副査の教授である西村秀和教授と前野隆司教授と Hasup Lee 助教、小木研究室所属の立山義祐助教から多くのご指導をいただきました。心から感謝申し上げます。

また、デジタルミュージアム事業の共同研究として、筑波大学図書館情報メディア研究科の西岡貞一教授、宮城大学事業構想学部の茅原拓朗教授、国立科学博物館人類研究部の篠田謙一先生、(株)TBS テレビの工藤尚美様、(株)文化総合研究所の高橋修二様から多くのご指導、助言をいただきました。本研究で使用された展示コンテンツの一部は(株)TBS テレビより提供いただきました。デモ展示を行うにあたり、(株)スピンの斉藤康太様、横田基成様に多くのご指導、ご協力をいただくとともに、本研究を行うにあたり、撮影環境や展示環境を提供していただきました。心から感謝申し上げます。

また、被験者としてたくさんの方々にご協力をいただきました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 政府統計の総合窓口: [http:](http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/eStatTopPortal.do)
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/eStatTopPortal.do>1.1.1
- [2] 文部科学省 HP (博物館の振興) : [http:](http://www.mext.go.jp/a_menu/01_l/08052911/1260406.htm)
http://www.mext.go.jp/a_menu/01_l/08052911/1260406.htm1.1.1
- [3] Ronald T. Azuma: A Survey of Augmented Reality; PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments, Vol.6, No.4 (1997), pp355-385.1.1.3
- [4] Bimber, O., Raskar, R.: Spatial Augmented Reality, Merging Real and Virtual Worlds, A K Perters Ltd, 2005.1.1.3
- [5] ARToolKit: [http:](http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/)
<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>1.1.3
- [6] Georg Klein, David Murray: Parallel Tracking and Mapping on a camera phone, ISMAR '09 proceedings of the 2009 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp83-86, 2009.1.1.3
- [7] 内川恵二: 色覚のメカニズム-色を見る仕組み-, 朝倉書店, 1998, pp5.1.2.2
- [8] Bimber, O., Fröhlich, B., Schmalstieg, D., Encarnaçao, L.M.: The Virtual Showcase. IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 21, No.6, pp. 48-55, 2001.2.1.1
- [9] Bimber, O., Fröhlich, B.: Occlusion Shadows: Using Projected Light to Generate Realistic Occlusion Effects for View-Dependent Optical See-Through Displays, ISMAR'02, pp.186-195, 2002.2.1.1
- [10] dreamoc: [http:](http://www.senlis.co.jp/dreamoc/)
<http://www.senlis.co.jp/dreamoc/>2.1.2
- [11] Ramesh Raskar, Greg Welch, Kok-Lim Low, Deepak Bandyopadhyay: Shader Lamps: Animating Real Objects With Image-Based Illumination, the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques, pp89-102, 2001.2.1.3
- [12] 青木豊: 博物館映像展示論-視聴覚教育をめぐる-, 雄山閣, 2004, pp74-75.2.2
- [13] Takashi Kajinami, Oribe Hayashi: Digital Display Case, ASIAGRAPH2010 in Tokyo, pp119-120, Odaiba, 2010.10.14-17 (ARTECH)2.2.1
- [14] 笠田和宏, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 撮影位置への誘導による過去映像と現在風景のシームレスな接続, 信学技報, Vol110, N0.108, MVE2010-43, pp117-122, 2010.
- [15] the Spirits of Beauty : <http://www.thespiritofbeauty-vancleef-arpels.com/2.3>
- [16] 内川恵二: 色覚のメカニズム-色を見る仕組み-, 朝倉書店, 1998, pp52-74.2.4
- [17] Murase, K., Ogi, T., Saito, K., Koyama, T.: Correct Occlusion Effect in the Optical See-through Immersive Augmented Reality Display System, ICAT 2008, pp.12-19, 2008.4.1
- [18] 小木哲朗, 林正紘, 藤瀬哲朗: 簡易没入型ディスプレイ CC Room の開発と映像生成手法, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文誌 v Vol.11, No.3, pp387-394, 2006.
- [19] 村瀬香緒里, 動的オクルージョン表現機能を備えた没入型 AR ディスプレイに関する研究, 筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科修士論文 , pp12, 2009.
- [20] REMO: [http:](http://www.ddd.co.jp/product/remo/index.html)
<http://www.ddd.co.jp/product/remo/index.html>
- [21] 大井義雄, 川崎秀昭: 色彩, 日本色研事業株式会社, 1996年, pp15
- [22] Mark Segal, Carl Korobkin, Rolf van Widenfelt, Jim Foran, Paul Haeberli: Fast Shadows and Lighting Effects Using Texture Mapping, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Vol.26, Issue 2, pp249-252, 1992.ii)
- [23] Shimada, I., Shinoda, K., Ono, M.: Precursor of the Inka Empire, The Golden Capital of Sican, TBS Television, 2009.6.3

国内会議での発表

- [1] 資延香里, 立山義祐, Hasup Lee, 小木哲朗, 西岡貞一, 茅原拓朗, 篠田謙一: 空間型 AR 展示のための効果的な色合成手法に関する検討, 第 15 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp106-109, 金沢, 2010.9.15-17
- [2] Kaori Sukenobe, Yoshisuke Tateyama, Hasup Lee, Tetsuro Ogi, Teiichi Nishioka, Takuro Kayahara, Kenichi Shinoda: Spatial AR Exhibition Sican Mask, ASIAGRAPH2010 in Tokyo, pp122, Odaiba, 2010.10.14-17 (ARTECH)

国際会議での発表

- [1] Kaori Sukenobe, Yoshisuke Tateyama, Hasup Lee, Tetsuro Ogi, Teiichi Nishioka, Takuro Kayahara, Kenichi Shinoda: Exhibition of Ancient Relics Using a Spatial Augmented Reality Thechnology, ASIAGRAPH2010 in shanghai, Vol.4, No1, pp223-224, Shanghai, 2010.6.11-14 (ARTECH)
- [2] Kaori Sukenobe, Yoshisuke Tateyama, Hasup Lee, Tetsuro Ogi, Teiichi Nishioka, Takuro Kayahara: Effective Contents Creation for Spatial AR Exhibition, The 9th ACM SIGGRAPG International Conference on VR Continuum and Its Applications in Industry (VRCAI2010), pp383-389, Seoul, Korea, 2010.12.12-13