

展示施設における
拡張現実ガイダンスサービスシステムの実用化

2015年7月

原 豪紀

学位論文 博士（工学）

展示施設における
拡張現実ガイダンスサービスシステムの実用化

2015年7月

慶應義塾大学大学院理工学研究科

原 豪紀

論文要旨

美術館や博物館といった展示施設において、展示物のガイダンス手法として拡張現実 (Augmented Reality:AR) が利用され始めている。しかしながら、そのほとんどが実証実験や話題作りのための短期運用に留まっており、まだ実用化されるまでには至っていない。

本研究では、展示施設における拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するための課題を解決する手法を提案する。そして、提案手法により実際の展示会で運用可能なシステムを構築し、実際に一般公開することによりその実用性を検証する。

展示施設において拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するためには、多くの展示物の中から閲覧者が注目している展示物やその部位をガイダンスサービスシステムが把握し、それに合致した解説コンテンツを閲覧者が理解しやすい形で提示することが重要である。多くの展示物の中から閲覧者が注目している展示物やその部位をガイダンスサービスシステムが把握する問題は、装置としてスマートフォンやタブレットのようなディスプレイ装置とカメラ付きの携帯端末を使う場合、展示会場における携帯端末のカメラの3次元位置と姿勢を高精度に取得する問題に置き換えることが出来る。これには一般的に2次元マーカ―や自然特徴量を用いた画像認識が用いられる。しかしながら、2次元マーカ―はそれ自体の見た目が美しくないという美観の問題と、2次元マーカ―自体が展示物を覆い隠す問題が発生する。自然特徴量を用いた画像認識の場合、閲覧者が展示物のどこを撮影すれば情報が得られるか分かりづらく、また、自然特徴量が十分に得られない展示物や立体展示物で認識精度が落ちるといった展示物に依存する問題がある。さらに、美術館や博物館といった屋内展示環境ではマーカ―認識に必要な光量が十分確保できないことが多く、2次元マーカ―・自然特徴量を用いた画像認識ともに認識精度が低下しがちである。つまり、展示施設において拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するためには、美観をなるべく損なわず、情報提示ポイントであることが直感的に理解でき、展示物の特徴に左右されず、光量が十分確保できない環境下でも利用可能な拡張現実ガイダンスサービスシステム向けの3次元位置・姿勢推定手法が必要となる。そこで、本研究では、これらの問題を解決する展示施設における実用的な拡張現実ガイダンスサービスシステムである「LEDをマーカ―として利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム」を提案する。これは、LEDのような発光体から携帯端末のカメラの3次元位置と姿勢を安定的かつ高精度に取得することで実現する。通常、検出した発光体を特徴点として射影変換によりカメラの姿勢を推定するためには4個以上の発光体が必要であるが、本手法では加速度センサを併用することで、発光体2個以上が撮影範囲内にあれば推定可能となっており、結果として処理の高速化も図れている。利用者の操作によっては発光体全てがフレームアウトする場合も考えられるが、ジャイロセンサからの相対的な回転角度を取得することで解説コンテンツ再生を継続する。これによりマーカ―位置を気にすることなく、動的なコンテンツ表現を実施することが可能になる。ユーザテストにより、実際の美術館や博物

館といった展示施設において、本手法が有効であることを示す。

閲覧者が注目している展示物やその部位に合致した解説コンテンツを閲覧者が理解しやすい形で提示するという問題は、閲覧者に情報提示するための情報提供装置の選択と、その情報提供装置で提示する解説コンテンツの内容の問題に置き換えることが出来る。一般的には、情報提供装置としてスマートフォンやタブレットのような画面付きの携帯端末を使用する事が多く、拡張現実ガイダンスの解説コンテンツとして、テキスト・画像・動画を展示物の手前に重畳して表示するため、展示物内部の立体的な情報が提供できていない問題がある。また、実運用を考えると、展示会場では閲覧者の手が荷物で塞がっていることが多く、両手であっても携帯端末を長時間持ち続けるのは重く不便、更には落として壊すのが怖い・理由は説明できないがなんとなく手を出しづらいといった携帯端末に対する心理的な抵抗感もあり、せっかく設置しても使われにくいといった情報提供装置に起因するユーザ体験の問題がある。つまり、展示施設において拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するためには、展示物内部の立体的な情報を提供でき、また、情報提供装置に起因するユーザ体験の問題が発生しない手法が必要となる。そこで、本研究では、これらの問題を解決する実用的な携帯端末による展示物内部の立体的な構造表示手法である「拡張現実ガイダンスにおける立体的内部構造表示手法」及び、情報提供装置に起因するユーザ体験の問題が発生しにくい展示物内部の立体的内部構造表示手法である「プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法」を提案する。「拡張現実ガイダンスにおける立体的内部構造表示手法」は、展示物を撮影した映像と提示する情報を適切な透過度と順序で合成することにより、展示物の内側に立体的な内部構造が存在するかのように見せる手法である。ユーザテストにより、実際の美術館や博物館といった展示施設において、本手法が有効であることを示す。「プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法」は立体視用の視差映像を展示物に直接投影(プロジェクションマッピング)し、液晶シャッター眼鏡を通して見ることで、展示物の内部構造を立体的に表現する。液晶シャッター眼鏡は携帯端末やHMDといった従来の情報提供装置と比較すると軽量かつケーブル接続が不要であり、情報提供装置に起因するユーザ体験の問題が発生しにくく、展示会場において使いやすいメリットもある。また、本手法はジェスチャ認識機能を追加実装しており、利用者が指差した箇所を選択的に表示することでインタラクティブ性を高めている。ユーザテストにより、実際の美術館や博物館といった展示施設において、本手法が有効であることを示す。

また、展示施設における拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するにあたり、展示環境において発生が予測されるグレアの問題も解決する必要がある。美術館や博物館といった展示施設では一般的にスポットライトのようなライトを使って展示物を照明するが、この光が拡張現実ガイダンスサービスシステムに用いるカメラに直接入射するとグレア(レンズフレア・ハレーション)を生成し、画質を損なうノイズ源となるため、カメラの3次元位置と姿勢を高精度に取得する事が困難となり、さらに、閲覧者からは携帯端末を通して展示物とその解説コンテンツを閲覧する妨げとなる。また、本システムを動物園・植物園、水族館といった屋外の展示施設で活用す

ることを考えた際、レンズに付着した水滴にライトの光が入射することでグレアが容易に発生することが予想できる。つまり、展示施設において拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するためには、グレアを特定し除去するための手法が必要となる。そこで、本研究では、グレアを特定し除去するための手法である「コンピューショナルフォトグラフィによるグレア除去手法」を提案する。本手法はレンズを透過する光を制御するための光シャッターをレンズ前面に設置し、光シャッターでグレアが発生している領域を選択的に閉鎖することにより、グレアを除去した画像を生成するものである。具体的には光シャッターによりレンズの一部のみを透過した光が結像した画像を、その透過する部位を連続的に変化させながら複数枚取得する。これらの画像列からグレアが発生しているレンズ領域で得られた画像を自動的に判定し、それ以外の画像を再合成することにより、グレアを除去した画像を取得するものである。実験により、本手法がグレアを除去できることを示す。

本研究で提案した手法により、展示施設における拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化可能であることを実証することができた。今後、実用的な拡張現実ガイダンスサービスシステムが展示施設において展示物を鑑賞する人に様々な発見や刺激、感動をもたらし、人と展示物との間の豊かなコミュニケーションが促進されることが期待できる。

目次

第1章 序論	1
1.1 展示施設の歴史.....	2
1.2 展示施設におけるガイダンスサービスシステム	3
1.3 本研究の目的：展示施設における拡張現実ガイダンスサービスシステムの実用化.....	7
1.4 本論文の構成	9
第2章 LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム	11
2.1 背景	12
2.2 関連研究	12
2.2.1 2次元マーカーによる拡張現実ガイダンスサービスシステム	12
2.2.2 自然特徴量を用いた画像認識による拡張現実ガイダンスサービスシステム	14
2.3 LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム	15
2.3.1 システムデザイン	15
2.3.2 LED 検出手法	16
2.3.3 LED 色認識手法.....	17
2.3.4 LED マーカー認識, カメラ姿勢推定手法.....	18
2.3.5 CG 合成手法	22
2.3.6 マーカーフレームアウト時の処理.....	22
2.4 従来手法との性能比較.....	23
2.4.1 姿勢推定誤差評価実験.....	23
2.4.2 最小認識マーカーサイズ・安定認識マーカーサイズ評価実験.....	25
2.4.3 最小認識照度・安定認識照度評価実験	25
2.4.4 性能比較.....	26
2.5 LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステムの評価.....	29
2.5.1 LED マーカー配置と展示解説コンテンツ	29
2.5.2 システム評価(ユーザテスト)	31
2.6 制限と今後の課題.....	35
第3章 拡張現実ガイダンスにおける立体的内部構造表示手法	37
3.1 背景	38
3.2 関連研究	38
3.3 立体的内部構造表示手法	38

3.3.1 拡張現実端末の姿勢推定, 3DCG モデル位置合わせ.....	39
3.3.2 ピラミッド裏面の描画.....	39
3.3.3 内部構造の描画.....	40
3.3.4 ピラミッド表面の描画.....	40
3.3.5 画像合成.....	41
3.4 展示物内部構造表示手法の評価.....	43
3.4.1 展示解説コンテンツ.....	43
3.4.2 システム評価(ユーザテスト).....	43
3.5 制限と今後の課題.....	44
第4章 プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法	45
4.1 背景.....	46
4.2 関連研究.....	46
4.3 プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法.....	47
4.3.1 システムデザイン.....	47
4.3.2 立体視プロジェクションマッピング.....	48
4.3.3 ジェスチャ認識.....	50
4.4 プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法評価.....	51
4.4.1 展示解説コンテンツ.....	51
4.4.2 システム評価(ユーザテスト).....	52
4.5 制限と今後の課題.....	55
第5章 コンピュータショナルフォトグラフィによるグレア除去手法	56
5.1 背景.....	57
5.2 関連研究.....	58
5.3 グレア発生メカニズム.....	60
5.4 水滴由来グレア発生領域特定とグレア除去.....	62
5.4.1 システムデザイン.....	63
5.4.2 グレア発生領域特定.....	63
5.4.3 グレア除去.....	66
5.5 検討.....	67
5.5.1 システム評価(実験結果).....	67
5.5.2 輝度の高い光源由来のグレア発生領域特定とグレア除去.....	70
5.5.3 制限と今後の課題.....	72
第6章 結論	73
6.1 本研究の成果.....	74

6.2 今後の研究課題.....	76
謝辞	78
参考文献	79
付録 A 本研究における展示活動について	83
A.1 展示活動について.....	84
A.2 太陽の船について.....	84
A.3 太陽の船 解説展示について	84
A.4 「古代七つの文明展」会場と拡張現実ガイダンスサービスシステム実施内容	86
付録 B 拡張現実ガイダンスサービスシステムの運用	87
B.1 使用機材の不具合.....	88
B.2 利用者に起因する不具合.....	89
B.3 変化する照明環境への対応.....	90
B.4 いたづら・盗難防止, 安全性確保.....	91
B.5 拡張現実ガイダンスサービスシステム運用について.....	92

目次

図 1-1 : ウォルムのミュージアム	2
図 1-2 : キャプションの例	3
図 1-3 : 国立民族学博物館 ビデオテークシステム	4
図 1-4 : 音声ガイダンス端末	4
図 1-5 : スマートフォンガイダンスアプリの例	5
図 1-6 : LDML RFID 閲覧システム概念図	5
図 1-7 : 時雨殿「大きな札」アトラクション	6
図 1-8 : 画像認識 AR 作品解説	7
図 2-1 : 2次元マーカー	13
図 2-2 : 遠距離における2次元マーカーの見え方	13
図 2-3 : 自然特徴量を用いた画像認識による拡張現実ガイダンスサービスシステム情報提供ポイントの明示例 ...	14
図 2-4 : LED 検出例	16
図 2-5 : iPad2 と 3DCG モデルの座標系設定	18
図 2-6 : iPad2 のピッチ角 θ を 3DCG モデルに反映	19
図 2-7 : iPad2 のロール角 δ を 3DCG モデルに反映	19
図 2-8 : iPad2 のピッチ角 θ , ロール角 δ を 3DCG モデルに反映した結果	20
図 2-9 : 推定したヨー角 σ を 3DCG モデルに反映した結果	21
図 2-10 : LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム運用例 ..	22
図 2-11 : ジャイロセンサによるカメラ位置推定	23
図 2-12 : 性能比較実験対象	24
図 2-13 : 姿勢推定誤差実験	24
図 2-14 : 最小認識マーカーサイズ・安定認識マーカーサイズ評価実験	25
図 2-15 : 最小認識照度・安定認識照度評価実験	26
図 2-16 : Frame Marker の実用例	28
図 2-17 : 本提案手法を運用した「古代七つの文明展」の様子	29
図 2-18 : LED 設置場所	30
図 2-19 : 太陽の船解説コンテンツ	31
図 3-1 : ピラミッド 3DCG モデル位置合わせ	39
図 3-2 : ピラミッド裏側の描画	39
図 3-3 : 内部構造を描画	40
図 3-4 : ピラミッド表面の描画	40
図 3-5 : 画像合成結果	41

図 3-6 : ピラミッド内部構造 3DCG モデル.....	41
図 3-7 : 半透明合成過程.....	42
図 3-8 : 半透明表現 実施例.....	42
図 3-9 : ピラミッド内部構造解説.....	43
図 4-1 : 「3DVison」 対応液晶シャッター眼鏡.....	48
図 4-2 : プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示システム全体図.....	48
図 4-3 : 立体視による立体効果.....	50
図 4-4 : ウォールプレゼンター.....	50
図 4-5 : プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示システム.....	51
図 4-6 : Julian Beever の Pavement Drawing.....	55
図 5-1 : グレアの例.....	57
図 5-2 : 画像加工ソフトウェアによるグレア除去の例.....	59
図 5-3 : カメラ光学系の概念図.....	61
図 5-4 : 水滴によるグレアの例.....	62
図 5-5 : グレア発生領域特定, および除去システム全体図.....	62
図 5-6 : 水滴付着位置検出.....	64
図 5-7 : 水滴付着位置特定実験結果.....	65
図 5-8 : グレア除去手順.....	66
図 5-9 : 標準的な実験装置のセットアップ.....	67
図 5-10 : 実験結果.....	68
図 5-11 : 環境を変えた場合の実験結果.....	69
図 5-12 : 本手法で検出したグレア発生領域.....	69
図 5-13 : 輝度の高い光源由来のグレア除去実験.....	71
図 6-1 : ガーデنز・バイ・ザ・ベイ プロジェクションマッピング解説.....	77
図 A-1 : ギザの大ピラミッド ジオラマ.....	85
図 B-1 : 使用機材のトラブル.....	89
図 B-2 : 照明切り替えフロー.....	90
図 B-3 : 太陽光が差し込む環境の例, 夕方になると西日の影響を受けた.....	91
図 B-4 : イタズラ防止.....	92
図 B-5 : 盗難防止ワイヤーロック.....	92

表目次

表 2-1：従来手法と提案手法の性能比較.....	26
表 2-2：LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム ユーザテスト	31
表 2-3：LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム 観察調査.....	33
表 2-4：LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム ヒアリング調査.....	34
表 3-1：立体的内部構造表示手法 ヒアリング結果.....	44
表 4-1：プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法 ヒアリング調査実施要項.....	52
表 4-2：プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法観察調査結果.....	53
表 4-3：プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法ヒアリング調査結果.....	54
表 5-1：カメラ設定と処理時間.....	70
表 A-1：太陽の船の展示会場，実施時期，実施内容と解説コンテンツ	86

第1章

序論

1.1 展示施設の歴史

博物館、美術館、植物園、動物園、水族館といった展示施設は世界中の至る所に設置され、その数は約 25,000 館にのぼると言われる。2011 年の文部科学省の統計によると、日本には 1,248 館存在し、年間約 2 億 8 千万人もの人が利用している [1]。

英語で博物館、美術館を意味するミュージアムの語源となったムセイオン(ギリシャ語: Μουσείον)は学問研究所であり、現代の博物館や美術館のような物品の収集や展示の場所ではなかった。現代の博物館の原型となったものは、15 世紀から 17 世紀の大航海時代にヨーロッパの王侯貴族が世界中から収集した物品を集めた「珍品陳列室(Cabinets of Curiosities)」や「驚異の部屋(Wunderkammer)」である。これは、その持ち主の地位と力を誇示するものとして用いられ、様々な物品が所狭しと並べられていた(図 1-1)。

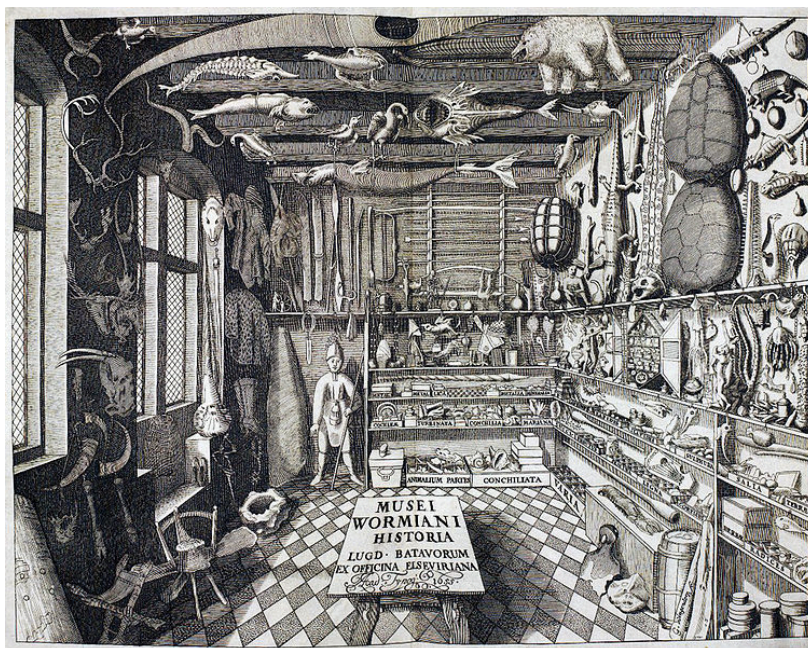


図 1-1 : ウォルムのミュージアム([2]より引用)

18 世紀には物品の特徴を元に体系的に分類し、並べ、整理するという博物学の発達とともに、自然標本のコレクションを展示する施設として大英博物館(1753 年)、美術品のコレクションを展示する施設としてルーヴル美術館(1793 年)が設置された。19 世紀になると産業革命の進行とともに万国博覧会が開催され、万博に出展した物品の恒久展示施設として、数多くの博物館が設立された。20 世紀に入るとモダン・アートの展開を受け、近代美術館が設立されるようになった。日本における博物館や美術館の概念は明治以降に西洋から輸入されたものであるが、日本でも西洋同様、古来より皇室や貴族階級の人々により物品収集がなされていた。代表的なものが正倉院

であるが、これ以外にも各地の寺社に献納品が集積され現代に伝わっている。江戸時代に入ると、地方の物品の展示の場として開かれるようになったのが物産会である。また、寺社の宝物を江戸や大阪といった都市部で一般に公開する出開帳という展示会も開催されていた。幕末になると、竹内保徳遣欧使節団に同行した福澤諭吉が1866年(慶應2年)にまとめた「西洋事情」の中で「博物館」「博覧会」という言葉が初めて使われ、1872年(明治5年)には日本初の博物館である東京国立博物館が文部省により設置された。東京国立博物館には日本が初めて参加したウィーン万国博覧会への出展物が展示され、この際、「美術」という言葉が初めて使われ、1877年(明治10年)の第一回内国勸業博覧会では「美術館」が設置された。明治時代は政府主導で博物館・美術館が設立されたが、大正時代より私設の博物館・美術館が設立されるようになった。第二次世界大戦の敗戦に伴って活動は停滞したものの、戦後の高度経済成長期には地方自治体により博物館・美術館が大量に設立された。今日では企業による自社製品・サービスの展示や保存を目的とした企業博物館や、生産活動を実施している工場そのものを博物館として整備し、一般消費者に開放することで広報活動に用いるようになってきている [2] [3]。

1.2 展示施設におけるガイダンスサービスシステム

これらの博物館・美術館では物品をただ展示するだけではなく、その物品の背景・関連情報も提供している。例えば展示物ごとにキャプション(図 1-2)が付属し、タイトル、作者、制作年、素材、所蔵者といった基本的な情報を提供し、そのキャプションを補完する200文字程度の解説パネルが付属することもある。閲覧者は、これらのキャプションや解説パネルと共に、展示物の解説がまとめられたパンフレットやブックレットを片手に展示物を鑑賞する。

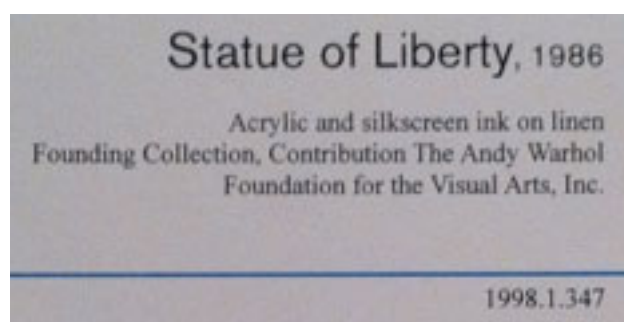


図 1-2 : キャプションの例 ([4]より引用)

近年ではICT技術の発達に伴い、これらの情報提供にもICT技術が用いられるようになってきており、各展示施設においてガイダンスサービスシステムとして提供されている。例えば、1977年に国立民族学博物館が導入した「ビデオテークシステム」(図 1-3)がある。本システムはキオスク型の固定端末で閲覧者が映像番組を自由に選択して視聴するビデオ・オン・デマンドシステム

ムであり、設置から約40年経過した2015年現在でもシステムをバージョンアップして継続稼働している。このように画面を備えた固定型の端末は情報量の多い映像を閲覧者に提供できるメリットはあるが、展示物と画面を交互に見る閲覧者の視線移動が発生し、また、どの展示物のどの部位について解説しているのかが分かりにくく、固定端末を多数設置する場合のコストの問題もある。



図 1-3 : 国立民族学博物館 ビデオテークシステム ([5]より引用)

多くの展示施設では、音声ガイダンス端末(図 1-4)による「音声ガイダンス」を導入しているが、これは閲覧者にとって視線を展示物から逸らすことなく解説情報を取得できる効果的なガイダンスサービスシステムである。展示物と音声解説コンテンツを紐付けする作業が必要であるが、展示物に割り当てられた番号を音声携帯端末に入力する手法が一般的である。音声携帯端末は会場で準備するが、貸出-返却-充電といった管理の手間やイヤホンやヘッドフォンを使いまわす上での衛生面での問題がある。



図 1-4 : 音声ガイダンス端末 ([6]より引用)

今日では、映像と音声による解説コンテンツをスマートフォンのアプリとして配布し、閲覧者が所有するスマートフォンにインストールして利用することが主流となってきた(図 1-5)。これにより前述の貸し出し機器管理の手間、衛生問題が解決されるようになったが、展示物と解説コンテンツの紐付けは依然として手動であることが多い。そこで次のステップとして、展示会場内における閲覧者の位置を取得することで展示物と解説コンテンツの紐付けを自動的に行う取り組みがなされている。

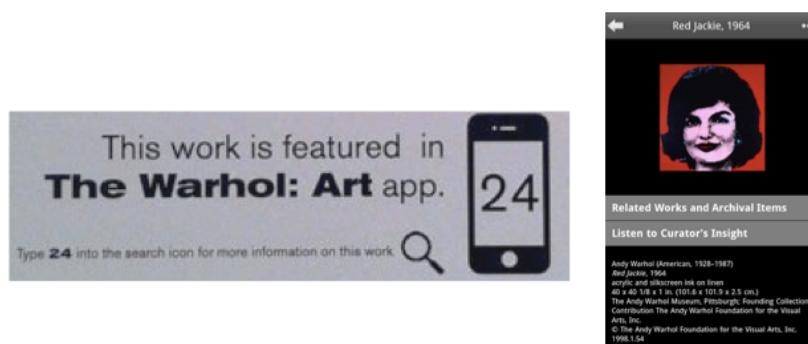


図 1-5 : スマートフォンガイダンスアプリの例([4] [7]より引用)

例えば「ルーヴル-DNP ミュージアムラボ(LDML)」 [8]では、閲覧者が持つ RFID (Radio Frequency Identifier) チケットを、床面に網の目状に設置したアンテナが読み取ることで展示会場内の閲覧者の位置を±1 m 程度の精度で取得し、展示物と解説コンテンツの紐付け及び自動再生を実現した。RFID チケット((図 1-6(a))を持った閲覧者が展示エリア(図 1-6(b))オレンジで示したエリア)に入ると、固定端末や携帯端末で解説コンテンツが自動再生される。この例では RFID と紐付けた個人属性(使用言語)に応じた解説の再生も実施した。



図 1-6 : LDML RFID 閲覧システム概念図([8]より引用)

また、複数の無線 LAN アクセスポイントからの電測情報から位置を測位する無線 LAN 測位法により展示会場内の閲覧者の位置を取得し、展示物と解説コンテンツの紐付けを行う手法も提案されている。例えばフランスのシテ科学産業博物館では無線 LAN 測位法「PlaceEngine」 [9] を利用し、閲覧者の位置に応じた解説コンテンツを提供する「セカイカメラ」 [10] をインストールした iPhone の貸し出しを実施していた。無線 LAN アクセスポイントからの電測情報は、壁・展示物・人体のような遮蔽物の影響を受けやすく精度的には±5 m 程度であるが、設置コストが安いメリットがある。これ以外にもユーザ位置の取得方法には GPS (Global Positioning System, GPS, 全地球測位システム) や BLE (Bluetooth Low Energy : 近距離無線通信技術 Bluetooth の拡張仕様)、超音波や赤外線ビーコンを利用したシステムなどがある。しかしながら、GPS を屋内で利用するためには高価な GPS リピーターを屋内に設置する必要があるため現実的ではない。BLE も無線 LAN 測位法と同様に Bluetooth ビーコンの電測情報から位置を測定しているため、壁、展示物や人体といった遮蔽物の影響を受けやすく、その精度はやはり無線 LAN 測位法と同様に±5 m 程度である。赤外線ビーコンを使った例としては、小倉百人一首をテーマにした展示施設「時雨殿」 [11] が挙げられる。ここでは天井に設置した赤外線ビーコンを感知できるように改造した携帯型ゲーム機 (Nintendo DS) により、閲覧者の位置に応じた解説コンテンツの自動再生やアトラクションが実施されていた。「時雨殿」で使われた赤外線ビーコンによるアトラクション「大きな札」 [12] の測位精度は、著者が実際に体験してみたところ、床に埋め込まれた 70 枚の 45 インチディスプレイ (約 100 cm × 60 cm) のどの上に閲覧者がいるか正確に判別できており、少なくとも±30 cm 程度の精度ではないかと推察できるが、この精度を実現するためには相当数の赤外線ビーコンの設置が必要だと考えられる。ここに挙げた展示会場内における閲覧者の位置を取得する手法は、会場内のどのエリアに閲覧者がいるかはわかるが、そのエリアのどの方向を向いているのか、更にはどの展示物に注目しているかまでは取得することができず、複数の展示物が近接している場合、閲覧者にどの展示物の情報を提供すればよいのか判断ができない問題がある。



図 1-7 : 時雨殿「大きな札」アトラクション ([12] より引用)

そこで、閲覧者に適切な情報を提供するため、端末に搭載されたカメラで展示物を撮影することで展示物と解説コンテンツの紐付けを実施するガイドサービスシステムが提供されるようになってきた。これらの手法はカメラで撮影した映像に解説コンテンツを重畳して表示することで現実空間よりも多くの情報を提供するため、拡張現実(Augmented Reality: AR)ガイドサービスシステムと呼ばれる。例えば「ルーヴル-DNP ミュージアムラボ」 [8]では、2次元マーカーを使った「AR 作品解説」と「AR ルート案内」、及び自然特徴量を用いた画像認識を使った「画像認識 AR 作品解説」 [13]を運用した(図 1-8)。



図 1-8 : 画像認識 AR 作品解説([13]より引用)

この他にも数多くの拡張現実ガイドサービスシステムが提案され、展示施設に導入されている事例もあるが、そのほとんどが実証実験や話題作りのための短期運用に留まっており、まだ実用化されるまでには至っていない。

1.3 本研究の目的: 展示施設における拡張現実ガイドサービスシステムの実用化

本研究では、展示施設における拡張現実ガイドサービスシステムを実用化するための課題を解決する手法を提案する。そして、提案手法により実際の展示会で運用可能なシステムを構築し、実際に一般公開することによりその実用性を検証する。

展示施設において拡張現実ガイドサービスシステムを実用化するためには、多くの展示物の中から閲覧者が注目している展示物やその部位をガイドサービスシステムが把握し、それに合致した解説コンテンツを閲覧者が理解しやすい形で提示することが重要である。多くの展示物の中から閲覧者が注目している展示物やその部位をガイドサービスシステムが把握する問題は、装置としてスマートフォンやタブレットのようなディスプレイ装置とカメラ付きの携帯端末を使う場合、展示会場における携帯端末のカメラの3次元位置と姿勢を高精度に取得する問

題に置き換えることが出来る。これには一般的に2次元マーカ―や自然特徴量を用いた画像認識が用いられる。しかしながら、2次元マーカ―はそれ自体の見た目が美しくないという美観の問題と、2次元マーカ―自体が展示物を覆い隠す問題が発生する。自然特徴量を用いた画像認識の場合、閲覧者が展示物のどこを撮影すれば情報が得られるか分かりづらく、また、自然特徴量が十分に得られない展示物や立体展示物で認識精度が落ちるといった展示物に依存する問題がある。さらに、美術館や博物館といった屋内展示環境ではマーカ―認識に必要な光量が十分確保できないことが多く、2次元マーカ―・自然特徴量を用いた画像認識ともに認識精度が低下しがちである。つまり、展示施設において拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するためには、美観をなるべく損なわず、情報提示ポイントであることが直感的に理解でき、展示物の特徴に左右されず、光量が十分確保できない環境下でも利用可能な拡張現実ガイダンスサービスシステム向けの3次元位置・姿勢推定手法が必要となる。そこで、本研究では、これらの問題を解決する展示施設における実用的な拡張現実ガイダンスサービスシステムである「LEDをマーカ―として利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム」を提案する。

閲覧者が注目している展示物やその部位に合致した解説コンテンツを閲覧者が理解しやすい形で提示するという問題は、閲覧者に情報提示するための情報提供装置の選択と、その情報提供装置で提示する解説コンテンツの内容の問題に置き換えることが出来る。一般的には、情報提供装置としてスマートフォンやタブレットのような画面付きの携帯端末を使用する事が多く、拡張現実ガイダンスの解説コンテンツとして、テキスト・画像・動画を展示物の手前に重畳して表示するため、展示物内部の立体的な情報が提供できていない問題がある。また、実運用を考えると、展示会場では閲覧者の手が荷物で塞がっていることが多く、両手であっても携帯端末を長時間持ち続けるのは重く不便、更には落として壊すのが怖い・理由は説明できないがなんとなく手を出しづらいといった携帯端末に対する心理的な抵抗感もあり、せっかく設置しても使われにくいといった情報提供装置に起因するユーザ体験の問題がある。つまり、展示施設において拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するためには、展示物内部の立体的な情報を提供でき、また、情報提供装置に起因するユーザ体験の問題が発生しにくい手法が必要となる。そこで、本研究では、これらの問題を解決する実用的な携帯端末による展示物内部の立体的な構造表示手法である「拡張現実ガイダンスにおける立体的内部構造表示手法」及び、情報提供装置に起因するユーザ体験の問題が発生しにくい展示物内部の立体的内部構造表示手法である「プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法」を提案する。

また、展示施設における拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するにあたり、展示環境において発生が予測されるグレアの問題も解決する必要がある。美術館や博物館といった展示施設では一般的にスポットライトのようなライトを使って展示物を照明するが、この光が拡張現実ガイダンスサービスシステムに用いるカメラに直接入射するとグレア(レンズフレア・ハレーション)を生成し、画質を損なうノイズ源となるため、カメラの3次元位置と姿勢を高精度に取得する事が困難となり、さらに、閲覧者からは携帯端末を通して展示物とその解説コンテンツを閲覧

する妨げとなる。また、本システムを動物園・植物園、水族館といった屋外の展示施設で活用することを考えた際、レンズに付着した水滴にライトの光が入射することでグレアが容易に発生することが予想できる。つまり、展示施設において拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するためには、グレアを特定し除去するための手法が必要となる。そこで、本研究では、グレアを特定し除去するための手法である「コンピュータショナルフォトグラフィによるグレア除去手法」を提案する。

1.4 本論文の構成

本研究の構成は以下の通りである。

第2章では、美観をなるべく損なわず、情報提示ポイントであることが直感的に理解でき、展示物の特徴に左右されず、光量が十分確保できない環境下でも利用可能である実用的な拡張現実ガイダンスサービスシステムとして「LEDをマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム」を提案する。これは発光体から携帯端末のカメラの3次元位置と姿勢を安定的かつ高精度に取得することで実現する。通常、検出した発光体を特徴点として射影変換によりカメラの姿勢を推定するためには4個以上の発光体が必要であるが、本手法では加速度センサを併用することで、発光体2個以上が撮影範囲内にあれば推定可能となっており、結果として処理の高速化も図れている。利用者の操作によっては発光体全てがフレームアウトする場合も考えられるが、ジャイロセンサからの相対的な回転角度を取得することで解説コンテンツ再生を継続する。これによりマーカー位置を気にすることなく、動的なコンテンツ表現を実施することが可能になる。ユーザテストにより、実際の美術館や博物館といった展示施設において、本手法が有効であることを示す。

第3章では、携帯端末による展示物内部の立体的内部構造表示手法である「拡張現実ガイダンスにおける立体的内部構造表示手法」を提案する。従来の拡張現実ガイダンスサービスシステムは展示物の手前に解説コンテンツを合成表示するものが多かったが、ユーザテストの結果から、展示物の内部構造を観察したいという要望が多いことが分かった。この問題に対し、携帯端末を用いて展示物の物体内部を立体的に透過表現する手法を提案する。本手法は、展示物を撮影した映像と提示する情報を適切な透過度と順序で合成することにより、展示物の内側に立体的な内部構造が存在するかのように見せる手法である。ユーザテストにより、実際の美術館や博物館といった展示施設において、本手法が有効であることを示す。

第4章では、情報提供装置に起因するユーザ体験の問題が発生しにくい展示物内部の立体的内部構造表示手法である「プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法」を提案する。ユーザテストの結果から、3章で提案した展示物内部構造の表示手法は立体感に乏しい場合があることが分かった。また、情報提供装置が重い・手を出しづらいといったユーザ体験の問題は3章で提案した手法では解決できない。これらの問題に対し、立体視とプロジェクションマッ

ピングを組み合わせた情報提示手法を提案する。本手法は立体視用の視差映像を展示物に直接投影(プロジェクションマッピング)し、液晶シャッタ眼鏡を通して見ることで、展示物の内部構造を立体的に透過表現する。液晶シャッタ眼鏡は携帯端末や HMD といった従来の情報提供装置と比較すると軽量かつケーブル接続が不要であり、情報提供装置に起因するユーザ体験の問題が発生しにくく、展示会場において使いやすいメリットもある。また、本手法はジェスチャ認識機能を追加実装しており、利用者が指差した箇所を選択的に透過表示することでインタラクティブ性を高めている。ユーザテストにより、実際の美術館や博物館といった展示施設において、本手法が有効であることを示す。

第5章では、展示施設で利用されるライトやカメラレンズに付着する水滴が原因となり発生が予見されるグレアに対し「コンピューショナルフォトグラフィによるグレア除去手法」を提案する。展示施設ではスポットライトのようなライトを使って展示物を照明するが、この光が拡張現実ガイドシステムに用いるカメラに直接入射するとグレア(レンズフレア・ハレーション)を生成し、画質を損なうノイズ源となるため、カメラの3次元位置と姿勢を高精度に取得する事が困難となり、さらに、閲覧者からは携帯端末を通して展示物とその解説コンテンツを閲覧する妨げとなる。また、動物園・植物園、水族館といった屋外の展示施設で活用することを考えた際、レンズに付着した水滴にライトの光が入射することでグレアが容易に発生することが予想できる。そこで、ライトからの入射光やレンズに付着した水滴により発生するグレアといった映像品質の劣化問題をコンピューショナルフォトグラフィ手法により解決する。本手法はレンズを透過する光を制御するための光シャッタをレンズ前面に設置し、光シャッタでグレアが発生している領域を選択的に閉鎖することにより、グレアを除去した画像を生成するものである。具体的には光シャッタによりレンズの一部のみを透過した光が結像した画像を、その透過する部位を連続的に変化させながら複数枚取得する。これらの画像列からグレアが発生しているレンズ領域で得られた画像を自動的に判定し、それ以外の画像を再合成することにより、グレアを除去した画像を合成するものである。実験により、本手法がグレアを除去できることを示す。

第6章では本研究の成果をまとめ、今後の研究課題を述べる。

また、本研究で提案する手法を使った拡張現実ガイドシステムの実証実験とユーザテストを実施した「古代七つの文明展～人と地球と太陽の船～」[14]の開催概要については付録Aで述べる。

第2章

LED をマーカーとして利用する
拡張現実ガイダンスサービスシステム

2.1 背景

展示施設において拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するために重要な要素の1つは、多くの展示物の中から閲覧者が注目している展示物やその部位をガイダンスサービスシステムが把握する手法であり、言い換えれば展示会場における携帯端末のカメラの3次元位置と姿勢を高精度に取得する方法である。一般的には2次元マーカー・自然特徴量を用いた画像認識が用いられる。しかしながら、2次元マーカーはそれ自体の見た目が美しくない上に展示物が隠されてしまう場合があるなど、主に美観に関する問題が発生する。自然特徴量を用いた画像認識の場合、閲覧者が展示物のどこを撮影すれば情報が得られるか分かりづらく、また、自然特徴量が十分に得られない展示物や立体展示物で認識精度が落ちるといった展示物に依存する問題がある。さらに、美術館や博物館といった屋内環境ではJIS照明基準総則 [15]により、例えば造形物展示で500-600 lx、絵画で150-200 lxと暗い照度が設定されているため、マーカー認識に必要な光量が十分確保できないことが多く、2次元マーカー・自然特徴量を用いた画像認識ともに認識精度が低下しがちである。

これらの問題を解決するには、美観をなるべく損なわず、情報提示ポイントであることが直感的に理解でき、展示物の特徴に左右されず、光量が十分確保できない環境下でも利用可能な拡張現実ガイダンスサービスシステムが必要となる。そこで本章では、これらの課題を解決する展示施設のための拡張現実ガイダンスサービスシステムの実用化を目的とし、LEDのような発光体をマーカーとして利用した、高精度且つ実用的な拡張現実手法を提案する。まず2.2節で関連する事例について解説し、提案手法の位置づけを明確にする。次に2.3節で実際に構築したLEDマーカーを利用した拡張現実ガイダンスサービスシステムについて説明し、2.4節で従来手法との性能比較を行い、2.5節では本システムを評価する。そして、2.6節で今後の課題について議論する。

2.2 関連研究

2.2.1 2次元マーカーによる拡張現実ガイダンスサービスシステム

一般的な2次元マーカーは黒枠で囲われた中に、何かしらのパターンが描かれている。図2-1(a)にARToolKit [16]のマーカーを示す。これらのマーカーは黒枠を明確に判別するため、周囲に余白を必要とする。このマーカーはユーザにとって見つけやすいという利点はあるものの、展示空間のスペースデザインを損なってしまう。ただし、最近ではVuforia [17]のFrame Marker (図2-1(b))のようにデザイン性に富んだマーカーも利用できるようになってきているが、デザ

イン優先のマーカーは従来のマーカーに比べて、認識精度が低下する問題がある。さらに、前述の博物館・美術館等の光量の少ない照明環境下では認識精度が低下しやすい。赤外線インクで作成した不可視マーカーを赤外線カメラで認識する方法 [18]もあるが、映像用のカメラに加え、マーカー検出用の赤外カメラおよび赤外線光源が必要となり、一般に市販されている携帯端末での実装が困難である。さらに、展示物と閲覧者の距離に比例してマーカーサイズが大きくなるという問題がある。特に数メートルにも及ぶ巨大な展示物の場合、全体をカメラの画角に収めるためにはユーザは離れた位置から撮影を行う必要があり、この場合、マーカーも距離に応じて大きなものを用意する必要がある。図 2-2 は iPad2 で 5 m 先にある 1 辺 80 cm の 2 次元マーカーを撮影したものである。この距離で 2 次元マーカーを認識するにはこのくらいの大きさの 2 次元マーカーが必要となり、展示物のかなりの部分が隠れてしまうことが分かる。

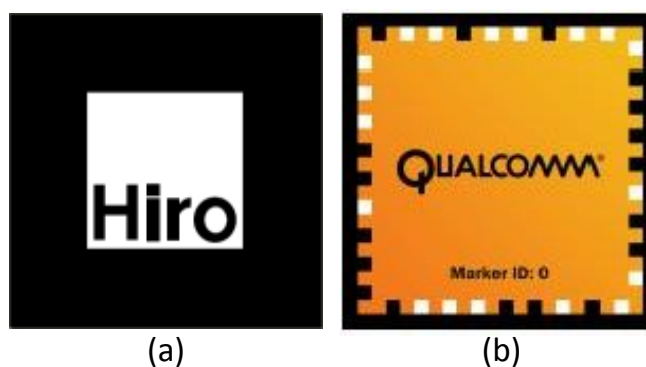


図 2-1 : 2 次元マーカー ([16] [17]より引用)



図 2-2 : 遠距離における 2 次元マーカーの見え方

2.2.2 自然特徴量を用いた画像認識による拡張現実ガイダンスサービスシステム

Zöllner らは古代遺跡の展示物に対して、MovableScreen と呼ばれるビデオシースルー型のシステムを用いた展示手法を提案している [19]. MovableScreen はランダムイズドツリー [20]と KLT 特徴点追跡 [21]をベースにした画像認識技術を活用している. このような自然特徴量を用いた画像認識技術をベースとした拡張現実ガイダンスサービスシステムは、展示物そのものをマーカーとして使うため、2次元マーカーに見られるようなスペースデザインの問題は発生しないが、閲覧者がどの展示物のどこを撮影すればよいか分からないという問題がある. 対応策として、情報を得られる場所を指し示すオブジェクトを設置する方法もあるが、これは2次元マーカーを設置するのと同様にスペースデザインを損なう問題が発生する. 図 2-3 にその一例を示す. これは著者が技術協力を行った展示会において、自然特徴量を用いた画像認識技術で地図を認識する拡張現実ガイダンスサービスシステムを構築した. 閲覧者は地図上の特定の場所を撮影することで情報が得られる仕組みであったが、開発段階のユーザテストでどこを撮影すれば情報が得られるか分かりにくいことが判明したため、地図に情報提供ポイントであることを示す星印を追加した. それでも初見の閲覧者にとってはわかりづらく滞留が発生したため、最終的には矢印型のオブジェクトを設置した.



図 2-3：自然特徴量を用いた画像認識による拡張現実ガイダンスサービスシステム情報提供ポイントの明示例
([22]より引用)

また、自然特徴量が十分検出できない展示物や立体展示物の場合は認識精度が落ちるという問題があるため、現状では自然特徴量が十分検出できる展示物なら問題なく運用できるが、そうでない展示物や立体物展示物への適用は困難である。また、2次元マーカー同様、博物館・美術館等の光量の少ない照明環境下では認識精度が低下しやすい。

2.3 LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム

前節までに述べたように、美術館、博物館では展示物の見やすさを第一に考えた照明、デザインやレイアウトを実施しており、拡張現実ガイダンスサービスシステムを導入するにあたっても見やすさとデザイン性を確保しつつ、同時に解説コンテンツとしての見やすさ、理解しやすさ、さらにはエンタテインメント性の高いコンテンツを提供すること要求されている。そこで、これらの相反する要求を満足するために、LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステムを構築した。

2.3.1 システムデザイン

本事例では、実証実験とユーザテストを実施する展示会「古代七つの文明展」に設置するピラミッドジオラマ向けにシステムデザインを実施した。具体的には拡張現実端末として iPad2 を選定、LED を設置したピラミッドジオラマの周りに 8 台設置し、ユーザが自由に手に取って解説コンテンツを楽しめるようにした。iPad2 は CPU 1GHz dual-core A5 プロセッサ、解像度 1280×720 のカメラと解像度 1024×768 のディスプレイを備える。また、画像処理ライブラリとして OpenCV2.1、アプリ開発環境として MacOS X を利用した。また、開発した LED 拡張現実ガイダンスサービスシステムは無料アプリとして配布しており、ユーザは自分の iPad2・iPhone4・iPod touch(4G)にアプリをインストールすることができる。ジオラマに設置する LED は直径 5 mm の拡散性の高いものを用いた。展示環境の照度 500-600 lx で LED が点灯していることを容易に認識でき、かつ眩しくない輝度として、インジケータやパイロットランプと同等の 150 mcd になるよう電圧・抵抗を調整した。

2.3.2 LED 検出手法

システムはカメラで撮影したカラー画像をグレースケール画像に変換し、最適な閾値 T_h で画像を2値化する。図 2-4 に照度 600 lx の環境下で輝度 150 mcd の LED を iPad2 で撮影して処理した結果を示す。

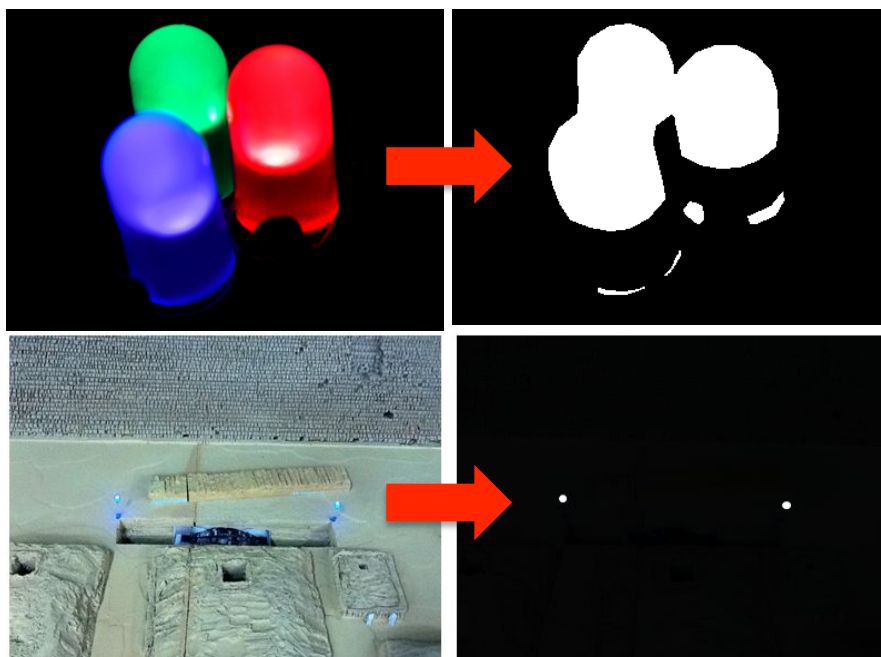


図 2-4 : LED 検出例

この照明条件下では LED 領域の輝度が一番高くなるため、最適な閾値を設定し、2 値化するだけで LED を容易に検出できる。しかし、iPad2・iPhone4・iPod touch(4G)はカメラ露出がマニュアル設定できないため、取得する画像の明るさが変化する。そのため、照明環境を一定にしたとしても 2 値化閾値を固定にすることはできない。そこで 2 値化閾値は以下のアルゴリズムにより動的に決定している。

- 1) 現在の閾値 T_h に初期設定閾値を設定

$$T_h = T_{h_Constant} \quad (2.1)$$

- 2) 現在の閾値 T_{hc} で 2 値化し白色領域を抽出し、その個数 N_r をカウントし、それぞれの面積 R_a を計算する。

3) 検出した白色領域の数 N_r とその面積 R_a からカメラの露出が高いか低いか判定する。白色領域が1個も検出されない場合、カメラ露出が低いとし、また、白色領域面積 R_a が白色領域面積閾値 $R_{a_Constant}$ よりも大きいのか、白色領域の数 N_r が LED の数 N_{LEDs} よりも多い場合はカメラ露出が高いと判断し、現在の閾値 T_h に閾値調整値 T_{ha} を加算し、(2.2)へ戻る

$$T_h = T_h + T_{ha} \quad (2.2)$$

$$Exposure = \begin{cases} High, & \text{if } (R_a > R_{a_Constant}) \text{ and } (N_r > N_{LEDs}) \\ Low, & \text{if } (N_r < 1) \end{cases} \quad (2.3)$$

$$T_{ha} = \begin{cases} T_{ha_Constant}, & \text{(High Exposure)} \\ -T_{ha_Constant}, & \text{(Low Exposure)} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$T_{ha} = \begin{cases} T_h, & \text{if } (0 \leq T_h \leq 255) \\ T_{h_Constant}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5)$$

4) 検出する白色領域が LED の数 N_{LEDs} 以下となるまで上記ステップを繰り返す。

想定展示照度 500-600 lx の環境下で 150 mcd の LED を使って予備実験を実施したところ、閾値 T_h の値は 170 から 230 の間で変動することが分かった。そこで初期設定閾値を 200 に、閾値調整値 T_{ha} を 2 に設定した。本システムは平均 15 fps 以上で動作するため、閾値調整値 T_{ha} が 2 の場合、閾値 T_h を算出する最大所要時間は 1 秒となり、実用に十分耐える。また、カメラと LED の最短距離 30 cm の場合、白色領域面積(LED 領域)は約 220 となることが判明したため、白色領域面積閾値 $R_{a_Constant}$ は 220 に設定した。異なる光環境下ではこれらの値も当然異なる。また、太陽光のような一定でない光環境下において、このアルゴリズムは機能せず、閾値 T_h の値は定まらない。

2.3.3 LED 色認識手法

LED 領域を検出した後、LED の色を評価する。基本的には検出された LED 領域の各ピクセルを評価するが、特に LED と携帯端末の距離が近い場合、LED 領域の中心部では RGB 各チャネルが飽和していることがあるため、LED 領域の外周部のピクセルで色評価を行った。

2.3.4 LED マーカー認識, カメラ姿勢推定手法

次に色の組み合わせを予め登録してあるマーカーデータと付き合わせ、マーカーID を取得するとともに、検出した LED の座標を用いて射影変換によりカメラの姿勢を推定する。射影変換によりカメラの姿勢を推定するには特徴点が4個以上必要となるため、LED も4個以上が必要であるが、条件を限定したり、他のセンサを併用したりすることでLED の個数を減らすことができ、結果として処理の高速化を図ることもできる。

本実施例では iPad2 の加速度センサを併用することで、LED2 個をマーカーとして利用している。まず、図 2-5 のように iPad2 と 3DCG モデルの座標系を設定する。次に、図 2-6 と図 2-7 に示すように、加速度センサから取得した iPad2 のピッチ角 θ 、ロール角 δ をそれぞれ 3DCG モデルに反映することで、図 2-8 に示すように 3DCG モデルを回転させる。

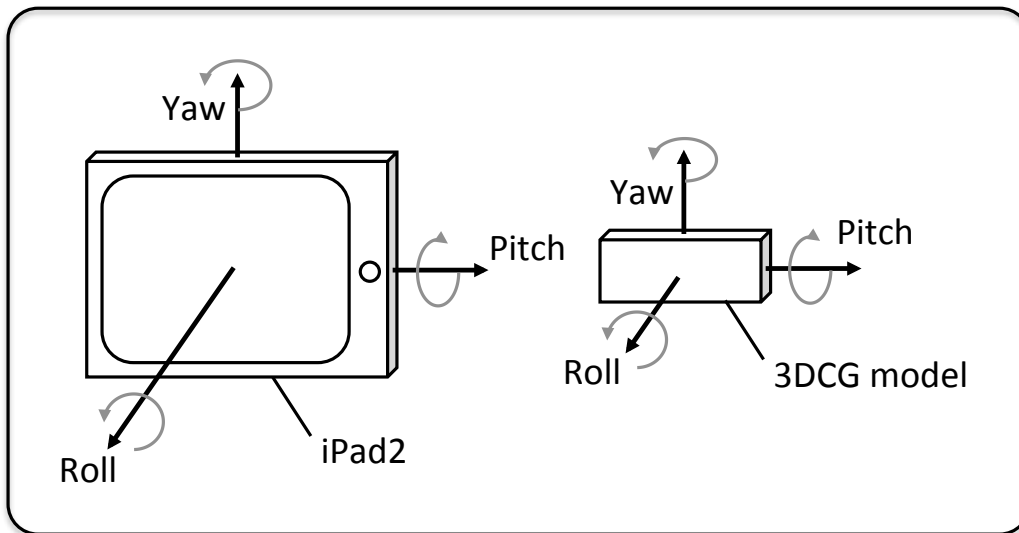


図 2-5 : iPad2 と 3DCG モデルの座標系設定

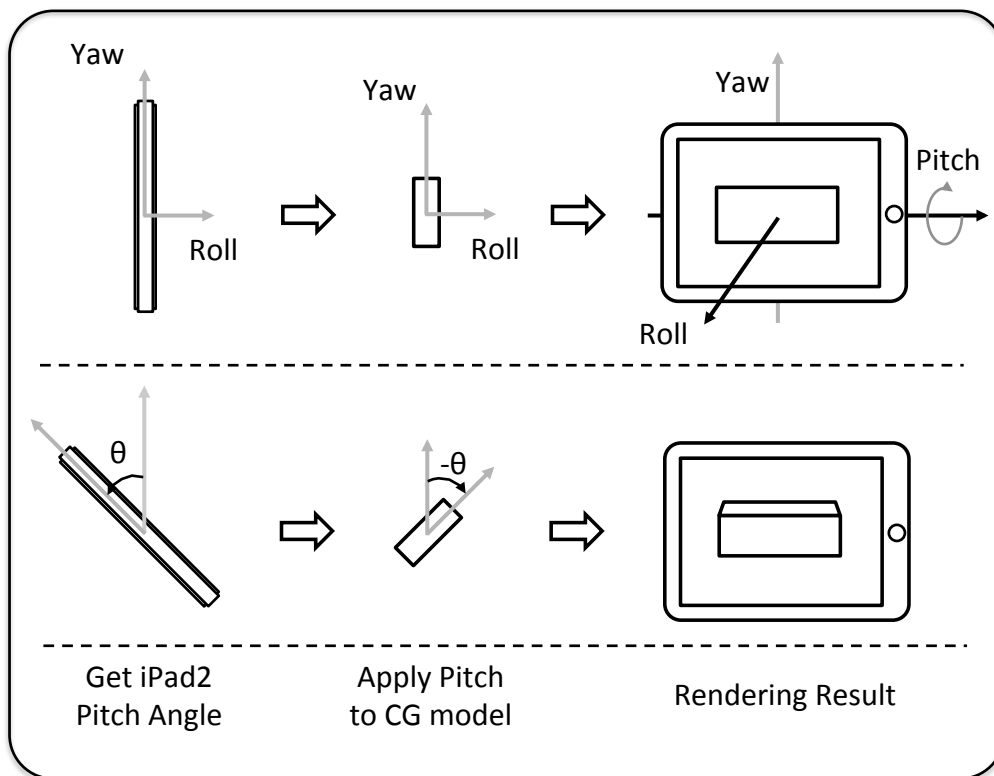


図 2-6 : iPad2 のピッチ角 θ を 3DCG モデルに反映

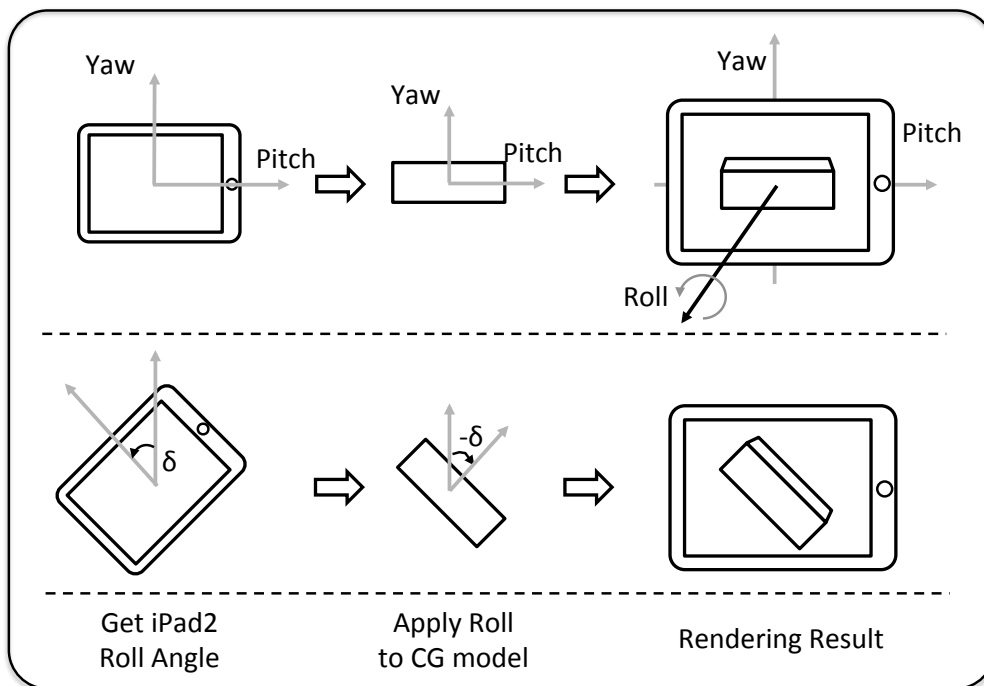


図 2-7 : iPad2 のロール角 δ を 3DCG モデルに反映

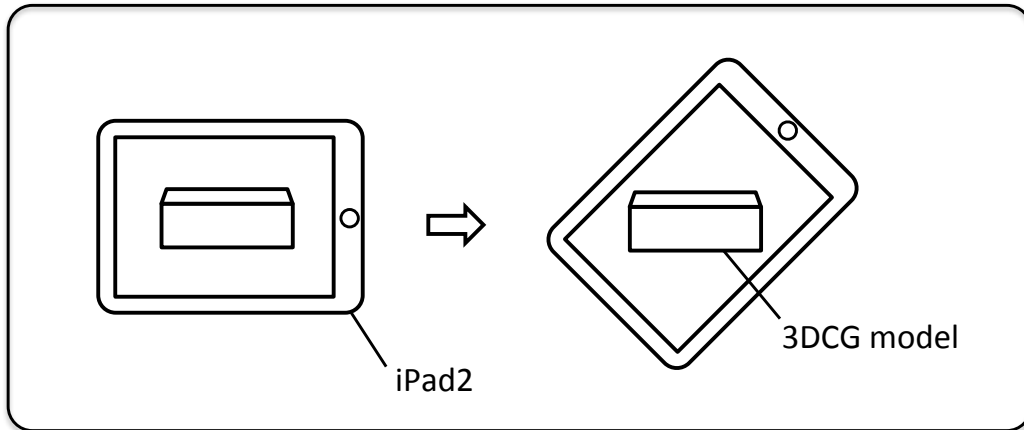


図 2-8 : iPad2 のピッチ角 θ , ロール角 δ を 3DCG モデルに反映した結果

ここで, iPad2 のピッチ角 θ , ロール角 δ は加速度センサから取得可能であるが, ヨー角 σ は取得できない. そこで下記手法でヨー角 σ の推定を実施した.

検出した 2 つの LED の iPad2 スクリーン座標 (X_1, Y_1) と (X_2, Y_2) から, LED の 2 次元方向ベクトル \mathbf{V}_{LED} が次のように得られる.

$$\mathbf{V}_{LED} = (\mathbf{V}_{2dx}, \mathbf{V}_{2dz}) = (X_1 - X_2, Y_1 - Y_2) \quad (2.6)$$

図 2-9 に示すように, iPad2 のヨー角 σ は, iPad2 スクリーン座標の X 軸に平行な単位ベクトル $\mathbf{V}_u = (1, 0)$ と LED 方向ベクトル \mathbf{V}_{LED} の内積から次のように近似できる.

$$\sigma = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{V}_{LED} \cdot \mathbf{V}_u}{|\mathbf{V}_{LED}| \cdot |\mathbf{V}_u|} \right) \quad (2.7)$$

ここで, スクリーン座標の X 軸の向きが重要となるが, 2 個の LED の色を変えておくことで X 軸の方向を一意に決定できる. しかしながら, ユーザにとってどの色の LED の組み合わせがマーカーとなるのかが分かりにくいいため, 本実施例ではユーザの観察位置が限定されていることを利用し, 同じ色の LED を使用して画面右方向向きの方向ベクトルを X 軸としている. これにより, 同じ色の LED 2 個を画面に捕らえることで解説 3DCG が表示されるため, 異なる色の LED を用いるよりもユーザにとって直感的に分かりやすいシステムとなるメリットもある.

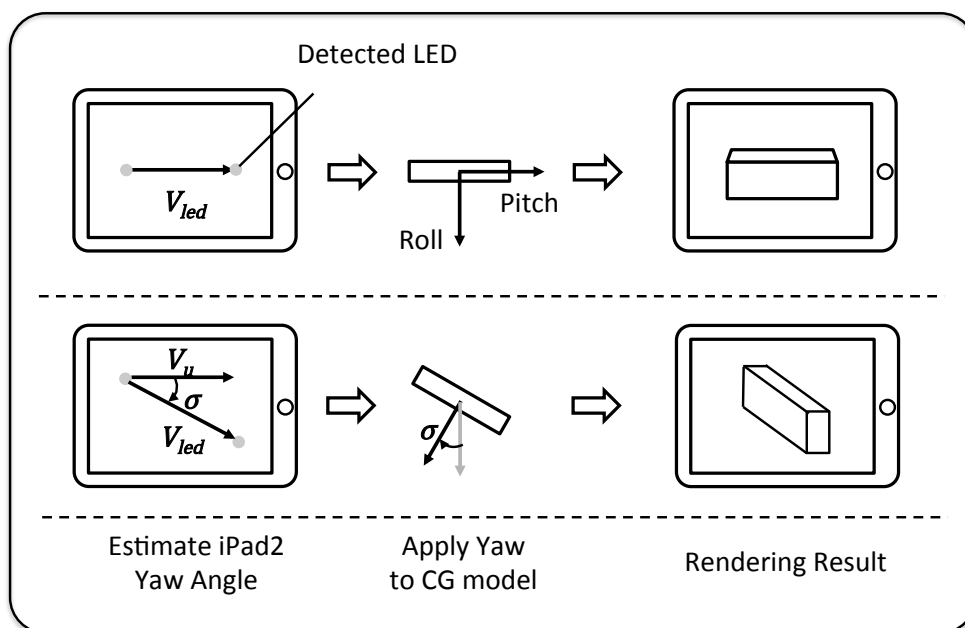


図 2-9 : 推定したヨー角 σ を 3DCG モデルに反映した結果

LED からカメラまでの距離は、検出した 2 つの LED 間の距離(スクリーン上のピクセル数)から推定できる。この距離に応じたスケールを 3DCG モデルに対して実施した

$$Scale = \left(\frac{Scale_{Constant}}{\sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}} \right) \quad (2.8)$$

ここで、 $Scale_{Constant}$ は 3DCG モデルサイズに対応した定数である。

また、検出した 2 つの LED 座標の中間値を求め、画面座標の中心 ($Center_x, Center_y$) からの移動量を平行移動量 $Translate$ として 3DCG モデルに反映した。

$$Translate = \left(Center_x - \frac{(X_1 + X_2)}{2}, Center_y - \frac{(Y_1 + Y_2)}{2} \right) \quad (2.9)$$

以上のアルゴリズムにより、同じ色の LED 2 個を画面に捕らえることで解説 3DCG が表示される、ユーザにとって操作が簡単かつ直感的に分かりやすいシステムとなっている。

もちろん、LED 1 個でもマーカーとして機能する。この場合、解説テキスト・動画・画像・音声を表示するスイッチ的な使い方が考えられる。本方式は前述の射影変換によりカメラの姿勢を推定する方法と比較すると正確性に欠けるが、低コストなカメラ位置推定手段である点を評価して導入した。

2.3.5 CG 合成手法

前述のステップで推定したカメラの姿勢データを元に、リアルタイム 3DCG を描画する。本システムではリアルタイム 3DCG エンジンとして Unity3d [23]を用いた。図 2-10 に「古代七つの文明展」にて本システムを運用した例を示す。この例ではピラミッドジオラマの地面に設置した緑色 LED マーカーを認識し、CG の船を表示している。



図 2-10 : LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム運用例

2.3.6 マーカーフレームアウト時の処理

マーカーを利用した拡張現実システムにおいて問題となるのが、マーカーがフレームアウトした場合の処理である。本実施例では解説が途切れてしまうことが無いよう、マーカーがフレームアウトした場合はジャイロセンサによるカメラの姿勢の推定を行っている。具体的には緑色 LED マーカーを認識して解説コンテンツが再生されるタイミングでジャイロセンサをリセットし、そこからの相対的な回転角度を取得することでピラミッドジオラマの地面に設置した緑色 LED マーカーがフレームアウトした場合でも問題なく解説コンテンツ再生が続くようにしている。これによりマーカー位置を気にすることなく、ダイナミックなアニメーションを表現することが可能になった。「古代七つの文明展」では地面から飛び立った船がピラミッドジオラマの上空を縦横無尽に飛び回り、空の彼方に光り輝きながら消えていくというエンタテイメント性の高いコンテンツを提供している。その様子を図 2-11 に示す。カメラ画像から緑色 LED マーカーがフレームアウトしているが、CG の船が表示され続けていることが分かる。



図 2-11 : ジャイロセンサによるカメラ位置推定

2.4 従来手法との性能比較

LED をマーカーとして利用した LED 拡張現実ガイダンスサービスシステムの性能を従来手法と比較しつつ検証した. 評価対象は図 2-12 に示すように(a)AR TOOL KIT マーカー, (b) Vuforia Frame Marker , (c)LED4 個を正方形の頂点となるよう配置した LED マーカー, (d) LED2 個を横方向(マーカー座標の X 軸に平行)に配置したマーカー, の 4 種類である. (b)の Frame Marker は「古代七つの文明展」のピラミッドジオラマにて実際に使用したもので, 美観に配慮するため Frame Marker を立体造形し, マーカー内部にヒエログリフを立体的に彫り込んだ意匠となっている. これらのマーカーに対し, 姿勢推定誤差, 認識マーカーサイズ, 認識照度について認識性能比較を実施した.

2.4.1 姿勢推定誤差評価実験

撮影したマーカーが画像の中央に一辺 50 ピクセルの幅となるよう iPad2 カメラの位置と距離を設定し, (a)AR TOOL KIT マーカー, (b) Vuforia Frame Marker , (c)LED4 個マーカーについてはマーカーをマーカー座標の X 軸を中心に 2 deg ずつ回転させながら姿勢推定を行い(図 2-13(a)), (d) LED2 個横マーカーについては, iPad2 をマーカーに対して回転させながらの実験を実施した(図 2-13(b)). マーカー平面に対してカメラの投影軸が垂直に近い場合, つまりカメラの投影面とマーカー平面がほぼ平行になっているような場合に誤差が大きくなることが知られている [24]ため, 特に誤差の大きくなる ± 10 deg での実験結果に注目した. 照明はマーカー表面が 500 lx となるよう調整した. 姿勢推定誤差はマーカー回転角度の真値と姿勢推定値の角度差の絶対値で評価した.

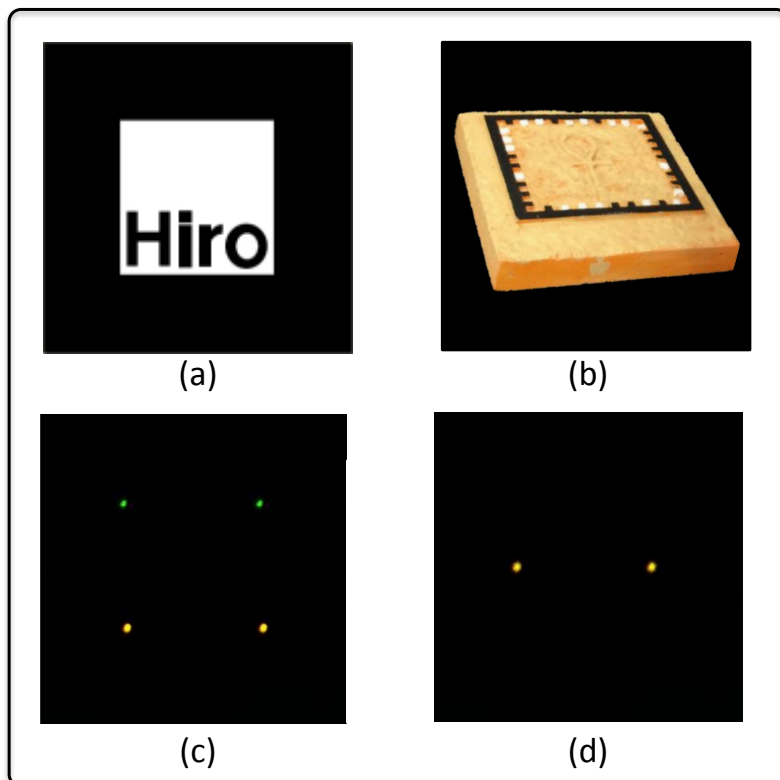


図 2-12 : 性能比較実験対象

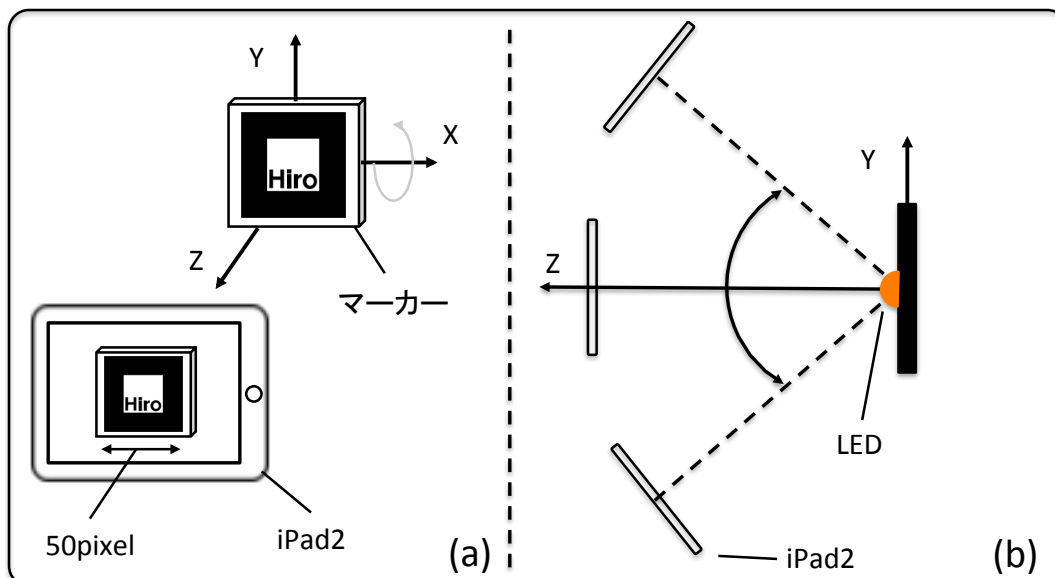


図 2-13 : 姿勢推定誤差実験

2.4.2 最小認識マーカーサイズ・安定認識マーカーサイズ評価実験

マーカー表面照度を 500 lx となるよう調整し、カメラの投影面とマーカー平面がほぼ平行になっているような場合に誤差が大きくなることを避けるため、15 deg 傾けて設置したマーカーが画像の中央に一边 50 ピクセルの幅となるようカメラの位置と距離を設定、カメラを少しずつ離していき、カメラ撮影開始後 2 秒以内に 1 度もマーカーが認識できないときのマーカー黒枠の 1 辺のピクセル数を計測し最小認識マーカーサイズとした。これは、解説コンテンツを表示するためのスイッチとしてマーカーを使う場合のことを考え、姿勢推定の誤差の大小に関わらず、2 秒間の間に一瞬でも認識できれば成功と評価した。設定時間 2 秒の根拠は、2 秒を過ぎると約半数のユーザがしびれを切らし情報の取得を諦めるためである [25]。また、カメラが静止してから 1 秒以内にマーカーを認識し、XYZ 全ての軸の角度誤差が 1 deg 以下となるマーカー黒枠の 1 辺のピクセル数を安定認識マーカーサイズとした。

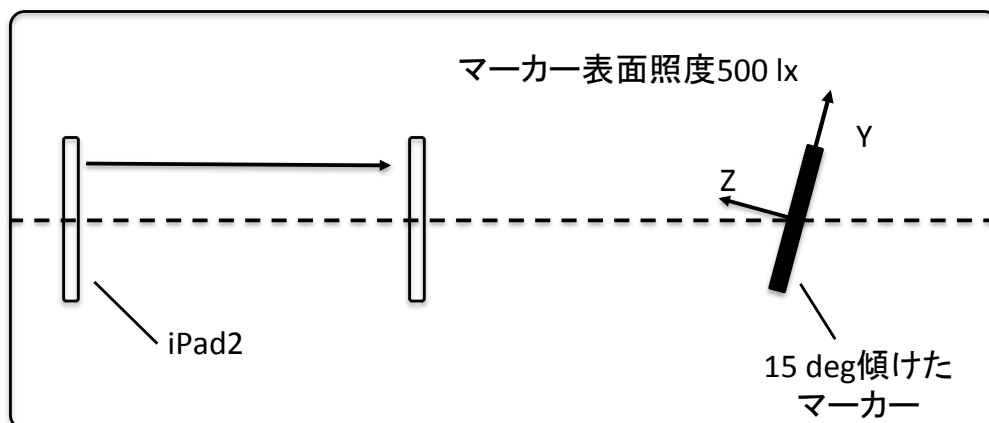


図 2-14：最小認識マーカーサイズ・安定認識マーカーサイズ評価実験

2.4.3 最小認識照度・安定認識照度評価実験

マーカー表面照度を 500 lx となるよう調整し、カメラの投影面とマーカー平面がほぼ平行になっているような場合に誤差が大きくなることを避けるため、15 deg 傾けて設置したマーカーが画像の中央に一边 50 ピクセルの幅となるようカメラの位置と距離を設定したのち、照度を少しずつ落としていき、カメラ撮影開始後 2 秒以内に 1 度もマーカーを認識できない時の照度を記録した。また、カメラ撮影開始後 1 秒以内にマーカーを認識し、XYZ 全ての軸の角度誤差が 1 deg 以下となる時の照度を安定認識照度とした。

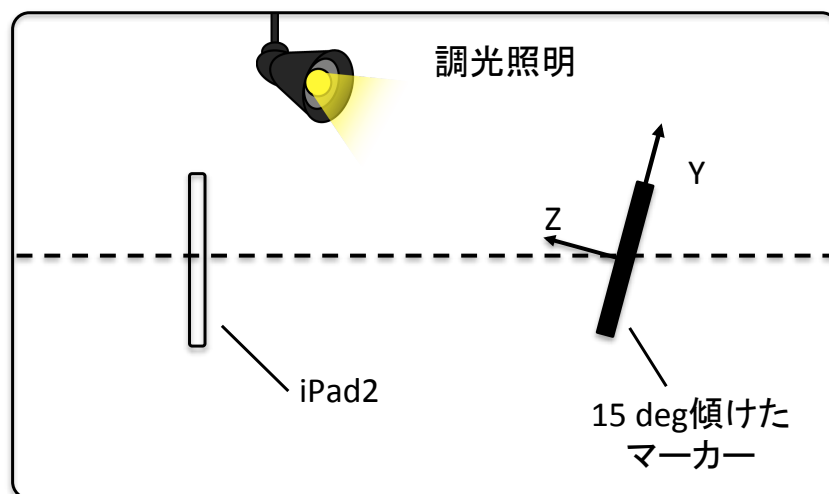


図 2-15 : 最小認識照度・安定認識照度評価実験

2.4.4 性能比較

評価結果を表 2-1 に示す。マーカーの姿勢推定誤差については、前述のカメラの投影面とマーカー平面が平行に近く誤差の大きくなる ± 10 deg での平均値とそれ以外の領域(15~50 deg)の平均値を記載している。

表 2-1 : 従来手法と提案手法の性能比較

		姿勢推定誤差 平均[deg] (± 10)	標準偏差 [deg]	姿勢推定誤差 平均[deg] ($\pm 15 \sim 50$)	標準偏差 [deg]	最小認識 サイズ [ピクセル]	安定認識 サイズ [ピクセル]	最小認識 照度 [lx]	安定認識 照度 [lx]
a) AR Tool Kit	X軸	3.24	1.23	0.70	0.23	25.2	71.2	70.9	336.1
	Y軸	3.59	1.34	0.67	0.33				
	Z軸	3.16	1.03	0.88	0.28				
b) FrameMarker	X軸	2.86	1.27	0.83	0.41	32.4	100.2	204.4	503
	Y軸	3.21	1.35	0.89	0.36				
	Z軸	3.19	1.26	0.96	0.45				
c) 4LED	X軸	3.17	1.05	0.91	0.40	14.2	28.8	0	0
	Y軸	2.96	1.38	0.89	0.54				
	Z軸	2.83	1.45	0.98	0.57				
d) 2LED	X軸	1.37	0.67	1.61	0.78	13.8	29.6	0	0
	Y軸	1.59	0.68	1.44	0.89				
	Z軸	1.33	0.84	1.21	0.93				

実験結果より、4つのLEDをマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステムの姿勢推定誤差については、従来手法と同等の精度を持っていると言える。2つのLEDしか用いない場合、今回の実験のようにLED設置方向が回転軸と平行だと回転角度を検出することがで

きず、例えばマーカーが動き回るようなシステムには向かないため、従来手法と比較すると利用方法に制限がある。逆にマーカーを固定して iPad2 を動かした場合、加速度センサを利用しているため、前述のカメラの投影面とマーカー平面が平行に近く誤差の大きくなる $\pm 10 \text{ deg}$ 付近では良好な精度を示しているように見えるが、マーカーの姿勢が既知であれば従来手法でも加速度センサを併用することで同程度の精度が得られることが考えられ、さらに、従来手法では誤差が小さくなる $\pm 10 \text{ deg}$ 以外の領域では明らかに従来手法に劣っている。しかしながら、LED の形状が立体的なため、真横方向からでも認識が可能となる利点がある。これは特に立体的な展示物の場合、従来手法のマーカーを用いる場合よりも閲覧者の立ち位置の制限が小さくなることを意味するため、拡張現実ガイダンスサービスシステムを構築する上で大きなメリットとなる。また、「2.3.4 LED マーカー認識、カメラ姿勢推定手法」でも述べたように、低コストなカメラ位置推定手段である利点も有る。

最小・安定認識マーカーサイズについては従来手法より優れていると言える。提案手法は従来手法のようにマーカー内部のパターンを認識する必要がない分小さなサイズでも認識できると考えられる。また、従来手法ではマーカー黒枠の周囲に 10 ピクセル程余白領域が必要なため、実際の最小認識マーカーサイズは 20 ピクセルほど大きくなる。さらに、実験では iPad2 を固定していたが、実際は閲覧者が手に取って操作するため安定せず、最小・安定認識マーカーサイズはさらに大きくなると考えられる。実際「古代七つの文明展」のピラミッドジオラマで **Frame Marker** を使った拡張現実ガイダンスを実施したが、マーカー表面の照度を 600 lx に調整した時の安定認識マーカーサイズは実験環境の 2 倍強となる約 200 ピクセルほどであった(図 2-16)。具体的には、会場において実際に 100 cm 離れた距離から安定して認識するために余白を含めて 1 辺 25 cm の **Frame Marker** が必要であった。iPad2 のカメラは 100 cm 離れた距離から横 80 cm × 縦 45 cm ほどの範囲を撮影可能であるが、ここに 1 辺 25 cm のマーカーが入るとなると、画面の約 1/6 がマーカーで占められる計算となり、iPad2 のカメラ解像度 1280 × 720 の約 1/6 ということで、安定認識マーカーサイズは約 200 ピクセルほどとなる。これではピラミッドジオラマの大部分をマーカーが隠してしまうこととなり、マーカーの配置位置が問題となる。例えば、解説コンテンツを表示したい部分にマーカーを配置すると、そのマーカーが解説したい部位を覆い隠してしまう。解説コンテンツを表示したい部位をカメラの真ん中に捉えた時に、マーカーがカメラの隅に来る位置に設置するしかないが、この場合、利用者がまずマーカーをカメラ中央に捉えてしまうため、情報がどこで表示されているのか分かりづらく、利用者が表示されている情報をよく見ようとカメラ動かした際にマーカーがフレームアウトしてしまい、情報が消えてしまうという問題が発生する。この点については、マーカーが観察対象を覆い隠さない本提案手法に優位性があるといえる。

最小・安定認識照度についても、マーカーそのものが発光するため照度 0 でも運用が可能であり、従来手法よりも優れている。従来手法も低い照度で認識可出来ているが、これは照度が一樣となるよう調整した実験環境下で、さらに 2 秒以内に一瞬でも認識すれば成功と評価した結果で

あり、コントラストが高くなるよう調整された展示照明環境下で安定的に認識するための最小認識照度はもっと高いと考えられる。実際、「古代七つの文明展」のピラミッドジオラマにて **Frame Marker** を使った拡張現実ガイダンスを実施した際は、安定してマーカーを認識させるため、マーカー用のスポットライトを追加し、マーカー表面の照度を **600 lx** まで上げた。逆に明るい環境、つまり最大認識照度については、**JIS 照明基準**で屋内環境での最大の照度となる **2,000 lx** の環境下において全ての手法で認識可能であり、屋内環境においては差がでなかった。しかしながら、直射日光が直接あたる屋外環境下(約 **100,000 lx**)において、従来手法は問題なくマーカーを認識したが、本提案手法では **LED** のマーカーのサイズにかかわらず認識することができず、直射日光が直接あたる屋外環境下においては従来手法よりも劣ることが分かった。つまり、本研究で提案する **LED** をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステムは屋内環境においては従来手法よりも優位性があるが、屋外環境下においては従来手法よりも劣る。



図 2-16 : Frame Marker の実利用例

2.5 LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステムの評価

本提案手法を「古代七つの文明展」で実際に運用し、評価を実施した。図 2-17 にその様子を示す。



図 2-17：本提案手法を運用した「古代七つの文明展」の様子

2.5.1 LED マーカー配置と展示解説コンテンツ

「古代七つの文明展」では、ピラミッドジオラマには緑(2LED)、青(2LED)、橙(4LED)の3種類のLEDを設置し、それぞれの色に対応する3種解説コンテンツを準備した。図 2-18 にLEDの設置場所を、解説コンテンツを図 2-19 に示す。具体的な解説コンテンツの内容は以下の通りである。

①第一の太陽の船再現(緑 LED2 個)

1954年にギザの大ピラミッド付近で発見され、発掘・復元された第一の太陽の船をCGアニメーションで再現したコンテンツ。太陽の船は紀元前2500年頃、古代エジプト・古王国時代第4王朝のファラオであったクフのために造られたとされている。本コンテンツは図 2-18 に示すようにジオラマのピラミッド右手前の地面(実際に第一の太陽の船が発掘された場所)に設置した緑

色の LED マーカーに反応して表示され、地面から飛び立った太陽の船がジオラマの上を縦横無尽に飛び回り、空の彼方に光り輝きながら消えていくというエンタテイメント性の高いコンテンツである。これは「2.3.6 マーカーフレームアウト時の処理」で説明したジャイロを活用したマーカーフレームアウト時の処理を前提としたコンテンツとなっている。

②第二の太陽の船 発掘状況の再現(青 LED2 個)

第二の太陽の船発掘復元プロジェクトの現場にて、船の部材が埋まっている船抗の石蓋をあげる様子を CG で再現。第二の太陽の船は第一の船が発見された船抗の西隣から吉村作治教授らにより 1987 年に発見され、現在発掘作業が行われている。本コンテンツは図 2-18 に示すようにジオラマのピラミッド左手前の地面(実際に第二の太陽の船が発掘された場所)に設置した青色の LED マーカーに反応して表示される。

③建設当時のピラミッド再現(橙 LED4 個)

4550 年前当時の石灰石の化粧板で表面が覆われ、白く輝いていた建設当時のクフ王の大ピラミッドの姿を CG アニメーションで再現したコンテンツ。本コンテンツは図 2-18 に示すようにジオラマのピラミッド右側面に設置した橙色の LED マーカーに反応して表示される。

これらの解説コンテンツは、女子美術大学 内山博子教授、首藤圭介助教、壇上誠助教らに制作して頂き、システムに組み込んだ。

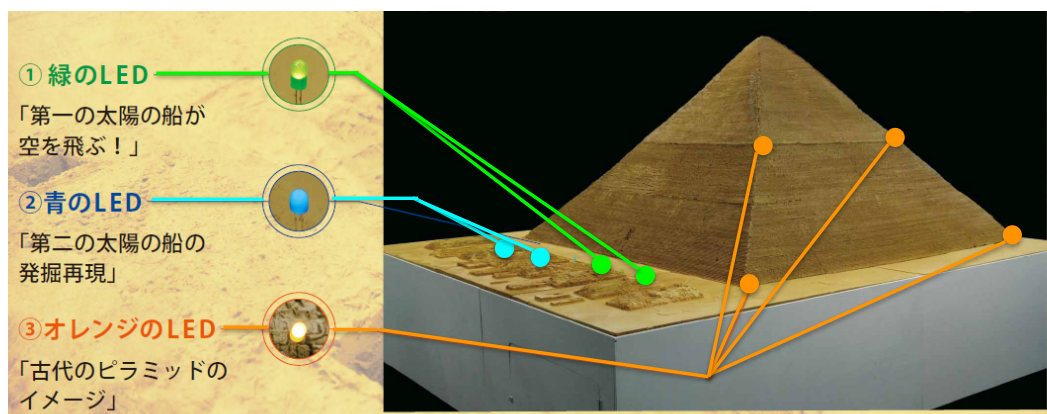
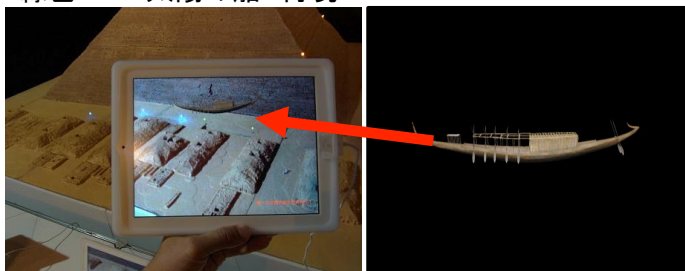


図 2-18 : LED 設置場所

緑色LED 太陽の船 再現



青色LED 太陽の船 発掘の様子



橙色LED 建設当時のピラミッド 再現

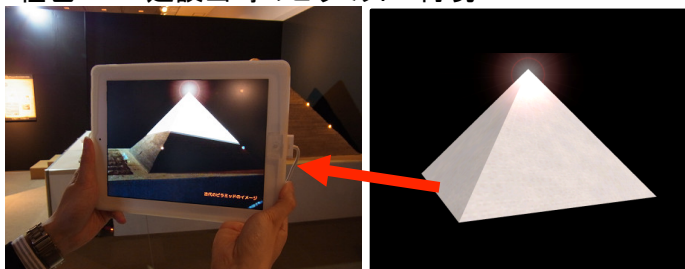


図 2-19 : 太陽の船解説コンテンツ

2.5.2 システム評価(ユーザテスト)

「古代七つの文明展」における本提案手法のユーザテストを表 2-2 に示す要領で実施した。

表 2-2 : LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム ユーザテスト

調査日時	2011/07/28(木) 11:00~17:00
調査会場	七つの文明展 福岡会場(福岡市博物館:福岡市早良区)
観察調査詳細	調査対象:1時間の間に訪れた30名 (小~中学生:11名、3-60代:19名) 展示物近くから12項目の観察調査を実施
ヒアリング調査詳細	調査対象:18名 (女性11, 男性7, 10代5, 30代1, 40代3, 50代4, 60代2, 70代3) 展示物閲覧が終わった来場者に、13項目のヒアリングを実施 観察調査とは別の来場者にヒアリングを実施

調査の設問については、1)「LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステムを体験してもらえるか」、2)「初見で正しく操作(体験)できるか」、3)「展示物の理解が深まるか」を主眼に設定した。観察調査結果を表 2-3 に、ヒアリング結果を表 2-4 に示す。

まず、1)「LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステムを体験してもらえるか」については、観察調査結果より通りかかったほぼ全員(30 名中 29 名)が体験する結果となった。展示会の中ではジオラマ、LED と当時新発売だった iPad2 の組み合わせは大変目立ち、またこの手の展示会では珍しい触ることができる展示物であることも足を止める要因だったのではないかと考えられる。

次に、2)「初見で正しく操作(体験)できるか」についても、30 名全員が正しく iPad2 を持ち、特に指示のない状態で LED に iPad2 を向けて操作することができていた。予め、会場の壁と展示台に操作方法を記したポスターを掲示していたが、やはりジオラマや iPad2 に目がいつてしまうようでポスターに気付かず、30 名中 24 名が操作説明を見ない状態での結果であり、本システムは情報提示ポイントを直感的に理解して操作可能であるといえる。もちろん、これは前の人や周りの人を伺って、使い方を学習できていた点も大きいものと考えられる。

最後に、3)「展示物の理解が深まるか」については 18 名中 14 名が「理解が深まる」と回答しており、こちらも当初の目的を果たすことができたと言える。

その他の観察・ヒアリング結果としては、落として壊すのが怖い・理由は説明できないがなんとなく手を出しづらいという携帯端末への抵抗感からか、実際に手に取るまで時間がかかってしまう傾向が高齢者を中心に見受けられた。また、展示会場では手が荷物で塞がっていることが多く、片手では iPad2 のような大画面携帯端末を持ちにくく、特に女性の場合は両手であっても重く不便という意見や、太陽の船が埋まっている状況や、ピラミッドの内部構造を直接観察したいとの要望があった。また、地面から飛び立った太陽の船がジオラマの上を縦横無尽に飛び回り、空の彼方に光り輝きながら消えていく第一の太陽の船のコンテンツは、「2.3.6 マーカーフレームアウト時の処理」で説明した通り、マーカーをロストしてもアニメーション再生が止まらないよう工夫しているが、逆に最後までアニメーション再生が止められず、コンテンツが起動している間に他のコンテンツを閲覧したくなった場合、どのように起動を止めたらいいか分からないという欠点が判明した。また、飛び回る第一の太陽の船を見失った場合も、どうしたらよいか分からなくなる欠点があることがわかった。

開発段階で見込んでいた展示環境の照度は造形物展示の照度規格である 500-600 lx だったが、実際の展示環境においては 300 lx を越えることがなかった。しかしながら、LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステムは会期を通して問題なく稼働した。

表 2-3 : LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム 観察調査

設問	観察調査		
	利用者状況	観察項目	観察記録
1	準備	展示物の前で立ち止まるか	1.立ち止まった: 29 2.立ち止まらなかった: 0 3.その他: 1
2	準備	システム設置台の前に立つか	1.立った: 30 2.立たなかった: 0 3.その他: 0
3	準備	利用デバイスの種類	1.備え付けのiPad: 29 2.手持ちのiPhone: 1 3.その他: 0
4	利用開始	デバイス持ち方	【iPadを持つ手】 1.両手: 30 2.片手: 0 【iPadの向き】 1.縦: 30 2.横: 0 【カメラをかざす方向】 1.LED: 30 2.その他: 0
6	利用中 (1コンテンツ目)	初めにどの色のLEDを体験したか	1.黄(ピラミッド): 1 2.緑(太陽の船): 22 3.青(発掘再現): 7 4.その他: 0
7		コンテンツを最後まで見たか	1.見た: 30 2.見なかった: 0 3.その他: 0
8	利用中 (2コンテンツ目)	次にどのLEDにかざすか	1.黄(ピラミッド): 3 2.緑(太陽の船): 4 3.青(発掘再現): 15 4.その他: 8
9		コンテンツを最後まで見たか	1.見た: 30 2.見なかった: 0 3.その他: 0
10	利用中 (3コンテンツ目)	次にどのLEDにかざすか	1.黄(ピラミッド): 15 2.緑(太陽の船): 0 3.青(発掘再現): 0 4.その他: 15
11		コンテンツを最後まで見たか	1.見た: 30 2.見なかった: 0 3.その他: 0
12	利用後	デバイスを展示台に戻せたか	1.戻せた: 27 2.戻せなかった: 3 3.その他: 0
13	その他	操作説明ポスターを見たか	1.壁面のポスター: 5 2.展示台ポスター: 0 3.両方見た: 1 4.どちらも見なかった: 24

第2章 LEDをマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム

表 2-4 : LEDをマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム ヒアリング調査

	ヒアリング項目	評価	ヒアリング詳細
1	太陽の船のことを事前に知っていたか	1. 知っていた: 0 2. 知らなかった: 18	
2	3つのコンテンツのうち、どのコンテンツを体験したか	1. 第一の船のみ: 0 2. 第二の船のみ: 0 3. ピラミッドのみ: 0 4. 1と2: 0 5. 1と3: 1 6. 2と3: 0 7. 全て: 17	・わかりやすかった。 ・面白かった。
3	そのうち、最も楽しめたコンテンツはどれか	1. 第一の船: 12 2. 第二の船: 4 3. ピラミッド: 2 4. 楽しめなかった: 0	・第一の船は動きがダイナミックなためか、特に子供層に受けがよかった
4	太陽の船への理解が深まったか	1. はい: 14 2. いいえ: 4	事前にTVの特番を観たので既に十分知っていた
5	閲覧時、迷ったこと、疑問に思ったことはあったか	1. あった: 4 2. なかった: 14	コンテンツが起動している間に他のコンテンツが見たくなった時、どのように止めたらよいかわからなかった。
6	ARという技術を知っていたか	1. 知っていた: 1 2. 知らなかった: 17	・第一の太陽の船がフレームアウトしてしまい、船を見失ってしまった。 ・iPadに初めて触った。 ・iPadに使い慣れていたなら、もっとおもしろいのかも知れない。
7	どこでARに接したか(設問11で「知っていた」と答えた場合)	1. ARアプリ: 0 2. ウェブ: 0 3. その他: 0	業界関係者です
8	初めてARに触れてみた感想は(設問11で「知らなかった」と答えた場合)	1. 楽しかった: 16 2. 普通: 2 3. よくわからなかった: 0 4. その他: 0	・無いものが出てきて楽しかった。 ・単純にすごい。 ・技術の進化を感じた。 ・ ピラミッドの中がARで再現出来たら更に面白い。
9	ARをどういったものに使えばおもしろいか	-	・レシピ本(料理の手順を再現) ・自由研究でARの技術調査(小学生) ・美術館、水族館(子供が楽しむ仕掛け) ・舞台演劇の演出(雨のシーン再現) ・建築物・住宅展示場(部屋のイメージ再現)
10	機器を使った展示は良かったか	1. 良かった: 16 2. 良くなかった: 0 3. どちらでもない: 2	・ただCGが動いただけだと中途半端(業界関係者) ・画面(LED)をタッチしてしまった。かざすと始まるのは楽が良いが、わかりづらいかも? ・もうちょっと内容があれば良いのでは。まだ入り口の段階だと思うので、これからどう進化していくか楽しみ。
11	同じような機器を使った展示が他にもあれば、見るか	1. 見る: 16 2. 見ない: 2	・面白かった。 ・こういう展示があればもっと行く。 ・ 気軽に持てるデバイス(iPhoneなど)にしたら良い(複数) ・混んでたら見づらいかも。 ・人が少なかったら観る。
12	PCを利用する頻度は週にどのくらいか	0~2時間/日: 13 2~4時間: 3 8~10時間: 2/18 0~2回/週: 11 7回/週: 7	・一日数時間、仕事を含めて毎日触っている人か、ほとんど触らない人かに分かれた。 ・PC利用頻度、所持台数の多い=ITリテラシーの高い人は来場していなかったため、「初めてiPadを触る」「ARを知らなかった」という結果に結びついたかと思う。
13	携帯電話、PCなどを含む、IT機器をいくつもっているか	0個: 2 1個: 3 2個: 13	・携帯電話を持っていない小中学生もいたが、DSやLite Wiiで遊んでいるとのこと。ゲーム機に慣れているため端末操作は使い慣れている様子。 ・携帯電話(個人に1台)、PC(一家に一台)を持っている人が多かった。
14	その他、コメントや感想など		・現代の技術はすごい。 ・美術館などにもっとこういう展示が増えれば良い。 ・またあったら観に来たい。もっと他の展示が観てみたい。 ・ジオラマ作成はものすごく大変だっただろう。人の模型も置いてあるので、ピラミッドの規模が分かりやすかった。 ・ 荷物を置く台が欲しい(片手でiPad持てない:複数) ・ 車椅子だとみづらい(iPadに手が届かない) ・ 端末を落として壊してしまいそうで怖い ・ なんとなく端末を手に取ることをためらってしまう。なぜかは理由を聞かれてもわからない。

2.6 制限と今後の課題

LED のような発光体をマーカーとして利用した、美観をなるべく損なわず、情報提示ポイントであることが直感的に理解でき、展示物の特徴に左右されず、光量が十分確保できない環境下でも利用可能である実用的な拡張現実ガイダンスサービスシステムを構築できた。

本システムは「2.3.2 LED 検出」にて記述したアルゴリズムにより LED を検出するため、JIS 照明基準(0-2,000 lx)に沿った屋内照明環境下であれば問題なく動作し、実際、展示会場では良好な性能を発揮したが、「2.4.4 性能比較」で指摘したように、直射日光が当たる屋外のような明るすぎる照明環境(約 100,000 lx)には対応できず、運用できないという欠点がある。

また、展示物によっては LED の設置が難しい、LED への電力供給が必要といった欠点もある。特に貴重な展示物や LED の色が邪魔になってしまう絵画のような展示物の場合、LED を設置できないことが確実である。この場合、解説用に展示物のレプリカを作成し、これに LED を設置すれば良い。レプリカを制作するコストと展示空間が余分に必要となるが、元々、貴重な展示物は劣化を防ぐためにレプリカを展示し、オリジナルは保管してあることも多い。そう考えると、本提案手法は、レプリカ、ジオラマ、キャプション、地図や案内図といった展示物を解説するための展示物に使用することが望ましいとも言える。

ユーザビリティの面から本システムを評価すると、前述したように、マーカーがフレームアウトした場合、ジャイロセンサによるカメラ姿勢の推定を行うことで、地面から飛び立った太陽の船がジオラマの上を縦横無尽に飛び回り、空の彼方に光り輝きながら消えていくというエンタテイメント性の高いコンテンツを提供しているが、ユーザにとっては一度太陽の船を見失うと再度発見することが難しく、また、コンテンツ再生中はマーカーを撮影しても何も起こらないため混乱してしまうユーザも見られた。また、iPad2 などの携帯端末に対する警戒感からか、美術館・博物館では手に取ることができる展示が少ないからなのか、拡張現実ガイダンスサービスシステムに興味を持ってもなかなか端末を手にとって貰えないという問題がある。これは他に端末を操作している人が居ない場合に顕著であり、他に操作している人が居る場合は、比較的スムーズに端末を手にする人が多かった。今後はより手にとってもらいやすい筐体デザインや雰囲気作りを検討する必要がある。また、若年層の反応は非常に良く、驚きの声が上がることがしばしばあり、展示物に対して強い興味を持たせることに成功していると言える。しかしながら、展示会場では手が荷物で塞がっていることが多く、片手では大画面携帯端末を持ちにくく、特に女性の場合は両手であっても重く不便という意見や、太陽の船が埋まっている状況や、ピラミッドの内部構造を直接観察したいとの要望があった。これらの問題については第3章と第4章にて改善策を提案する。

以上のことより、本システムは欠点があるものの、実用的な拡張現実ガイダンスサービスシステムであるといえる。ユーザテスト実施時にはエンタテイメント的な要素も多く盛り込んでおり、本来の解説コンテンツという目的からはやや外れる。しかしながら、ただ解説映像を上映するよ

りも、このような仕組みを用いて驚きを演出することで閲覧者の興味・集中力を喚起し、見る、知る、感じる、考えるというプロセスを効果的に補助することが可能となっている。

本章では発光体をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステムを提案した。本章の寄与は特に、スペースデザインを損なうことなく、距離にかかわらず安定した認識性能を示し、直感的に分かりやすい、さらにはエンタテインメント性の高いコンテンツを提供する手法の構築にある。その基本となる着想は低コストな LED 認識手法と携帯端末に搭載されている加速度センサ・ジャイロセンサを併用することである。また、本システムは一般に市販されている携帯端末を対象としており、特別な情報提供装置を必要としないことも特徴である。

第3章

拡張現実ガイダンスにおける 立体的内部構造表示手法

3.1 背景

展示施設において拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するために重要なもう一つの要素は、閲覧者が注目している展示物やその部位に合致した解説コンテンツを閲覧者が理解しやすい形で提示するという手法であり、閲覧者に情報提示するための情報提供装置の選択と、その情報提供装置で提示する解説コンテンツの内容の問題に置き換えることが出来る。2章で提案したLEDをマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステムは情報提供装置として携帯端末(iPad2)を利用しており、これを実際の展示会で運用してユーザテストを実施した結果、展示物の内部構造を直接観察したいという要望が多いことが判明した。このように、拡張現実ガイダンスの解説コンテンツとしては、テキスト・画像・動画を展示物の手前に重畳して表示するのが一般的であり、展示物内部の立体的な情報が十分に提供できていない問題がある。そこで本章では、携帯端末を用いて展示物内部の構造を立体的に透過表現する立体的内部構造表示手法を提案する。

3.2 関連研究

拡張現実分野において、内部構造を観察するための透視表現による情報提示について数多くの研究がなされている。例えば Sandor らは壁や対象物を透かして、対象物の背景を表示する手法を提案している [26]。稲見らは再帰性反射材を遮蔽物体に対し貼付した上で事前にもしくは実時間で撮影した背景映像を頭部搭載型プロジェクタで投影することによる光学迷彩を提案している [27]。しかし、これらの提案手法は2次元的な背景を透過表示することを主眼とした仕組みであり、対象物の内部を3次元的に表示する立体的内部構造表示手法ではない。そこで、対象物の内部を3次元的に表示する立体的内部構造表示手法を構築した。

3.3 立体的内部構造表示手法

本事例では、実証実験とユーザテストを実施する展示会「古代七つの文明展」に設置するピラミッドジオラマ向けに展示物の内部構造を立体的に観察できる立体的内部構造表示システムを構築した。このシステムでは、ピラミッドジオラマを仮想的に内部が空洞の箱とみなし、CGで内部に存在する構造を表現する。このCGをカメラからのライブ映像と適切な透過度と順序で合成することによって、ピラミッド模型の内側に立体的な内部構造が存在しているように見せる手法である。以下の手順を踏むことで、リアリティの高い立体的内部構造表示を実現した。尚、立体的内部構造表示手法に用いる携帯端末は第2章で使用したiPad2を引き続き利用している。

3.3.1 拡張現実端末の姿勢推定, 3DCG モデル位置合わせ

第2章で説明したようなLEDや2次元マーカースを使って携帯端末の姿勢推定を行い、3DCGレンダリングを実施するUnity3dのカメラ座標として取り込む。次に予め計測しておいたピラミッドジオラマの相対位置のパラメータ(マーカースの中心を原点とした時のピラミッド3DCGモデルの平行移動・回転・拡大縮小量)をピラミッド3DCGモデルに反映させる。これにより、ピラミッドジオラマとピラミッド3DCGモデルの位置合わせが完了する(図3-1)。

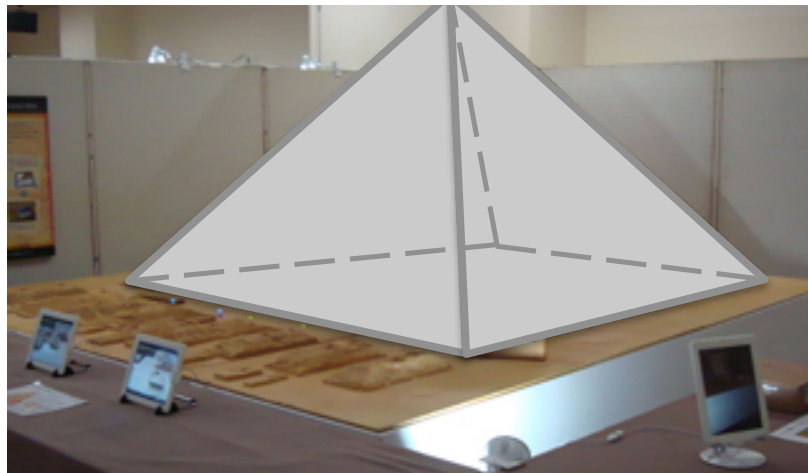


図 3-1 : ピラミッド3DCG モデル位置合わせ

3.3.2 ピラミッド裏面の描画

ピラミッド3DCGモデルの裏面を描画する。裏面とは、表面カリングによってピラミッドの外側からは見えないが、内側からのみ見えるように設定している、という意味である。これは半透明表現をする際、透けた先の壁を見せることでリアリティを向上させるための工夫である。

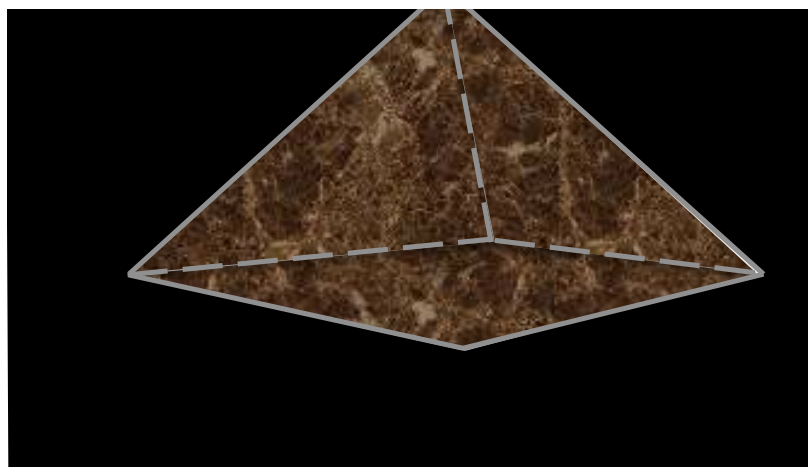


図 3-2 : ピラミッド裏側の描画(容易な理解の為に補助線を表示している)

3.3.3 内部構造の描画

内部構造を描画する。ここではわかりやすい例としてティーポットを描画した。

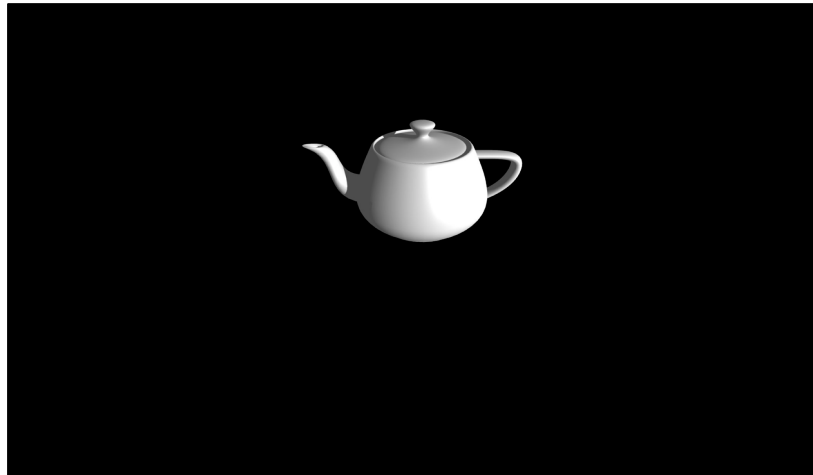


図 3-3 : 内部構造を描画

3.3.4 ピラミッド表面の描画

ピラミッド表面を描画する。具体的には、iPad2 撮影画像からピラミッド領域だけを切り出す。ピラミッド裏面を描画した画像をコピーし(図 3-4(a)), 2 値化してピラミッド形状のマスクを作成する(図 3-4(b))。このマスクと iPad2 で撮影したリアルタイム画像(図 3-4(c))の論理積(AND)を計算することで、ピラミッド表面部分のリアルタイム画像(図 3-4(d))を得ることができる。

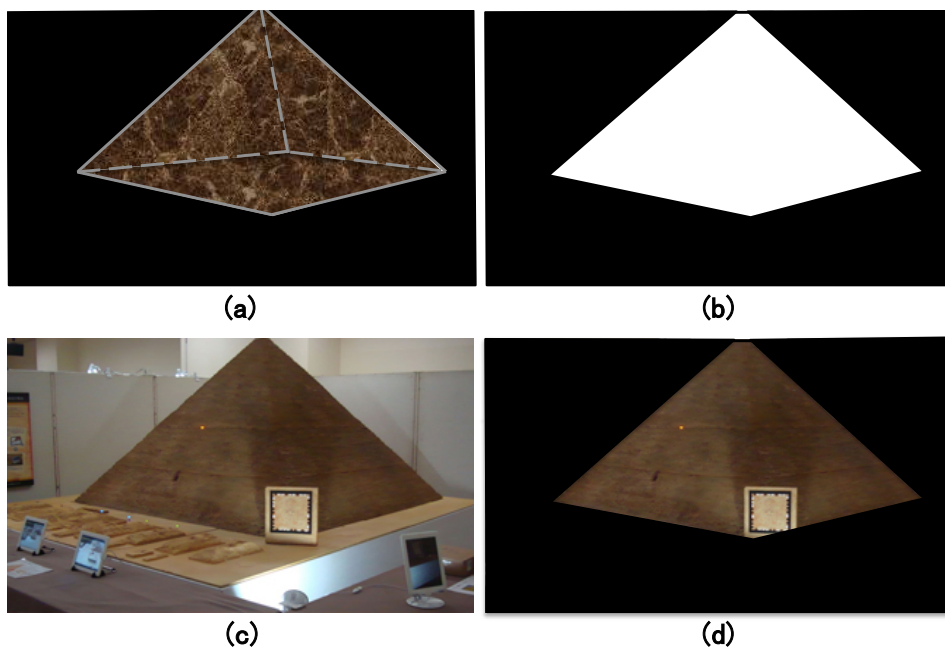


図 3-4 : ピラミッド表面の描画(ピラミッド領域の切り出し)

3.3.5 画像合成

iPad2 で撮影したリアルタイム画像にピラミッド裏面画像(3.3.2 節), 内部構造画像(3.3.3 節), ピラミッド表面画像(3.3.4 節)の順に合成する. ピラミッド表面画像には透過度 30%を設定し, 内部構造とピラミッド裏面画像が透けるようになっている.



図 3-5 : 画像合成結果

図 3-6 に実際に使用したピラミッド裏面(図 3-6(a))とピラミッド内部構造(図 3-6(b))の 3DCG モデルを示す. ピラミッド裏面には事前に撮影したピラミッドジオラマ画像の明度を落としたものをテクスチャとして貼り付けた. また, ピラミッド内部構造は, 内部の通路や玄室の形状を正確に再現した.

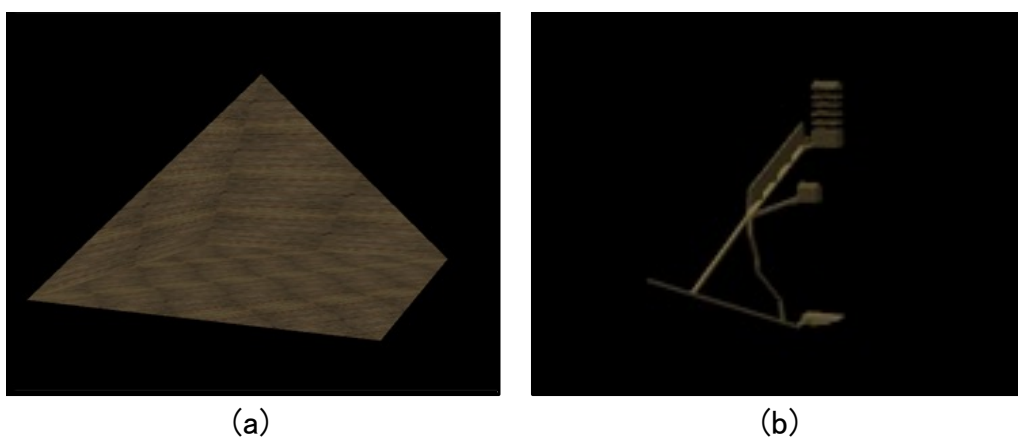


図 3-6 : ピラミッド内部構造 3DCG モデル

図 3-7 に実際の半透明合成過程を示す。図 3-7(a) はピラミッド裏面を描画した状態、図 3-7(b) は内部構造を描画して合成した状態、図 3-7(c) はピラミッド表面を描画して合成した状態である。

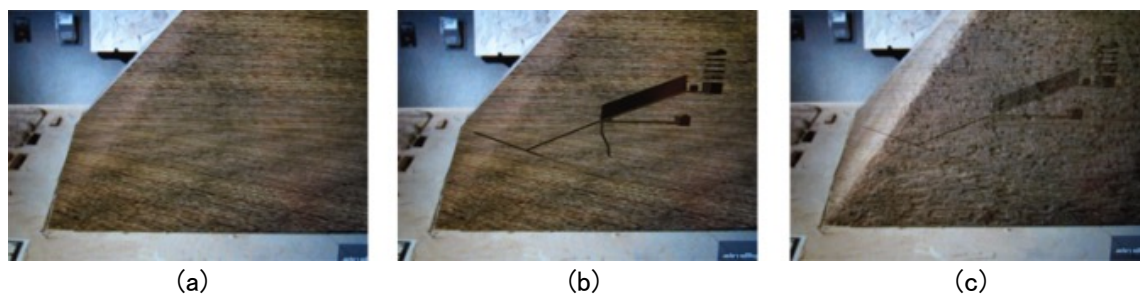


図 3-7 : 半透明合成過程

本手法は撮影画像に 3 つのレイヤーを重ねるだけの簡単な実装手法であるが、その透過感が高く、特に iPad2 を動かしながら見ると、視点を動かした時にそれぞれの要素の相対的な位置変化を正確に感じ取ることができ、あたかもピラミッド模型の内側に内部構造が存在するかのように見える。最終的な結果を図 3-8 に示す。



図 3-8 : 半透明表現 実施例

3.4 展示物内部構造表示手法の評価

本システムを「古代七つの文明展」で実際に運用し、評価を実施した。図 3-9 にその様子を示す。



図 3-9 : ピラミッド内部構造解説

3.4.1 展示解説コンテンツ

解説コンテンツはピラミッド内部の大回廊や下降・上昇などの通路、「王の間」や「重力軽減の間」などの内部構造が、ピラミッド内でどのような大きさでどのように配置されているかをアニメーションで説明する。ピラミッド内部構造の解説コンテンツは、女子美術大学 内山博子教授、首藤圭介助教らに制作して頂き、システムに組み込んだ。

3.4.2 システム評価(ユーザテスト)

各種の事情により会場でのユーザテストは実施できなかったが、設置・撤収時の僅かな時間での簡単な観察調査を行った結果、「システム(展示)を体験してもらえるか」については概ね問題が無いようであり、またコンテンツ内容も好評だった。参考までに開発部署内で実施したレビュー時のヒアリング調査結果を表 3-1 にまとめる。ヒアリングに応じたのは 20 代のソフトウェア技術者 10 名(女 2, 男 8)である。内部構造の見え方については概ね良好だったが、立体感に乏しく、内部にあるように見えない場合があることがわかった。

表 3-1 : 立体的内部構造表示手法 ヒアリング結果

	ヒアリング項目	評価	ヒアリング詳細
1	太陽の船のことを事前に知っていたか	1. 知っていた: 10 2. 知らなかった: 0	・社内関係者なので全員知っていた
3	コンテンツを楽しめたか	1. はい: 5 2. いいえ: 5	・見飽きたARにもこういう使い方があるのに驚いた ・工業製品の説明に使いそう
4	展示物への理解が深まったか	1. はい: 8 2. いいえ: 2	・分かりやすいかも
5	閲覧時、迷ったこと、疑問に思ったことはあったか	1. あった: 0 2. なかった: 10	・マーカーを捉えつつ、ピラミッド内部を観察するのは難しい。 ・マーカーを中央に写すので、どこで情報が表示されているかわかりづらかった
6	内部構造が透けたように見えたか	1. 見えた: 7 2. 見えなかった: 3	・透けたようには見えるが、立体感があまりない ・手前のように感じた ・遠近感がつかめなかった
7	その他、コメントや感想など		・マーカーの見た目がイマイチ、邪魔に感じる ・今時画像認識じゃないなんて。。。 ・iPad重すぎ ・マーカーいたずらされたらどうなるの？

3.5 制限と今後の課題

携帯端末を用いて展示物の内部構造を立体的に透過表示する立体的内部構造表示手法を実装することができた。今後、本提案手法を用いることでより実用的な拡張現実ガイダンスサービスを実施することができる。本手法は応用範囲が広く、展示施設だけではなく、展示物がある現地での活用が期待できる。たとえば半透明のレイヤー構造を応用して、墓を透視して棺桶を表示し、さらにそのなかのミイラを表示するガイダンスサービスを非破壊・非侵襲的に実施できる特長がある。最近では、この非破壊・非侵襲的に観光案内ができる点が商業的にも重要視されており、例えばユネスコの世界遺産登録にも非破壊・非侵襲的な展示方法であることが重要な審査基準となっている。

しかしながら、携帯端末を用いた本提案手法には立体感に乏しく、内部にあるように見えない場合があることがわかった。また、携帯端末が重く、持ち続けることが辛い点もやはり問題である。これらの問題については第4章で解決方法を提案する。

第4章

プロジェクションマッピングによる 立体的内部構造表示手法

4.1 背景

展示施設において拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するために重要なもう一つの要素は、閲覧者が注目している展示物やその部位に合致した解説コンテンツを閲覧者が理解しやすい形で提示するという手法であり、閲覧者に情報提示するための情報提供装置の選択と、その情報提供装置で提示する解説コンテンツの内容の問題に置き換えることが出来る。そこで、第3章で提案した携帯端末を使った立体的内部構造表示手法を実際の展示会に導入・運用した。しかしながら、「2.5.2 システム評価(ユーザテスト)」にて判明した、携帯端末に対するユーザ体験(落として壊すのが怖い・理由は説明できないがなんとなく手を出しづらい・重い)の問題は解決できていない。また、「3.5 制限と今後の課題」で論じたように、iPad2のような携帯端末では立体感に乏しく、内部構造が展示物の内部にあるように見えない場合があることが分かった。

そこで、本章ではこれらを解決するため、情報提供装置に起因するユーザ体験の問題が発生しにくい展示物内部の立体的内部構造表示手法である「プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法」を提案する。本手法は立体視用の視差映像を展示物に直接投影(プロジェクションマッピング)し、液晶シャッター眼鏡を通して見ることで、展示物の内部構造を立体的に透過表現するものである。液晶シャッター眼鏡は従来の携帯端末やHMDといった情報提供装置と比較すると軽量かつケーブル接続が不要であり、情報提供装置に起因するユーザ体験の問題が発生しにくく、展示会場において使いやすいメリットもある。また、本手法はジェスチャー認識機能を追加実装しており、利用者が指差した箇所を選択的に表示することでインタラクシオン性とエンタテインメント性を高めている。ユーザテストにより、実際の美術館や博物館といった展示施設において、本手法が有効であることを示す。

4.2 関連研究

プロジェクションマッピングとは、プロジェクタを用いて物体に対して映像を映し出す技術の総称であり、現実世界に存在する投影対象にバーチャルな映像を投影する、拡張現実の1手法であり、Spatial Augmented Reality (SAR : 空間拡張現実)とも呼ばれる。最近では、建築物などの巨大な立体物に錯視的な手法で擬似的に奥行きを感じさせるような映像を投映するものを特に「3D プロジェクションマッピング」呼び、例えば長崎県佐世保市のハウステンボス [28] のように定番イベントとして定着しつつある。プロジェクションマッピングの技術そのものは古くからあり、ディズニーランドのホーンテッドマンションのようなアトラクションで1970年代には実用化されていた [29]。空間拡張現実については Oliver らがまとめた Spatial

Augmented Reality [30]が当該分野を俯瞰するのに最適であるが、最近ではマイクロソフトが Illumiroom [31]と呼ばれる、ゲーム画面がテレビを超えて壁や家具一面に投影される新しいタイプの空間拡張現実の仕組みを提案したり、トヨタが街中に駐車した自動車にプロジェクションマッピングで映像を投影する新しいデジタルサイネージの提案 [32]をしたりしている。

一方、立体視技術を取り入れた 3D 映画や 3D テレビが最近話題となった。これらは左眼用と右眼用の映像を、スクリーンや画面に表示し、専用の眼鏡などにより、左眼には左眼用の映像のみを、右眼には右眼用の映像のみを利用者に見せることで立体視を実現する二眼式ステレオ立体映像と呼ばれるものであり、古くは 1992 年に米国イリノイ大学が開発した CAVE などでも活用されていた。また、最近では nVidia のようなグラフィックチップメーカーが立体視の規格化を行っている [33] [34]。

4.3 プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法

4.3.1 システムデザイン

本システムでは二眼式ステレオ立体映像規格「3DVision」 [35]に対応したアプリケーションを作成し、3DVision 対応プロジェクタで投影された映像を、3DVision 対応液晶シャッターメガネ(図 4-1)を通して見ることで、投影対象の内部に 3DCG オブジェクトが立体的に存在するかのように見せる。本システムは、HP 社デスクトップ PC Z600(CPU 2.5GHz メモリ 16GB Windows7 Ultimate 64bit)、GeForce GTX 560 グラフィックボード、NEC 社 3D プロジェクタ V300W (解像度 1280×800)、nVidia 3DVision キット(ワイヤレス液晶シャッターメガネ、USB 接続同期信号発信器)で構成される。3DCG のレンダリングには Unity3d を利用した。

また、インタラクティブ性とエンタテインメント性を高めるため、「ウォールプレゼンター」 [36]を使用して手の位置角度を検知、指を差している地点を特定し、その部分だけが透過して見えるような実装とした。当初は指差しの代わりにジャイロセンサを内蔵した懐中電灯型オブジェクトをもたせることを検討したが、展示会場での運用の難しさを考慮し、指差し型のインターフェースとした(図 4-2)。

これにより、利用者は液晶シャッター眼鏡をかけて、会場に設置されたピラミッド模型の前に立ち、ピラミッドに向けて腕を伸ばして指差すと、指を差した先のピラミッド表面が半透明になり、内部の通路や部屋などの構造物を立体的に透視することができる。



図 4-1 : 「3DVison」 対応液晶シャッタ眼鏡 ([35]より引用)

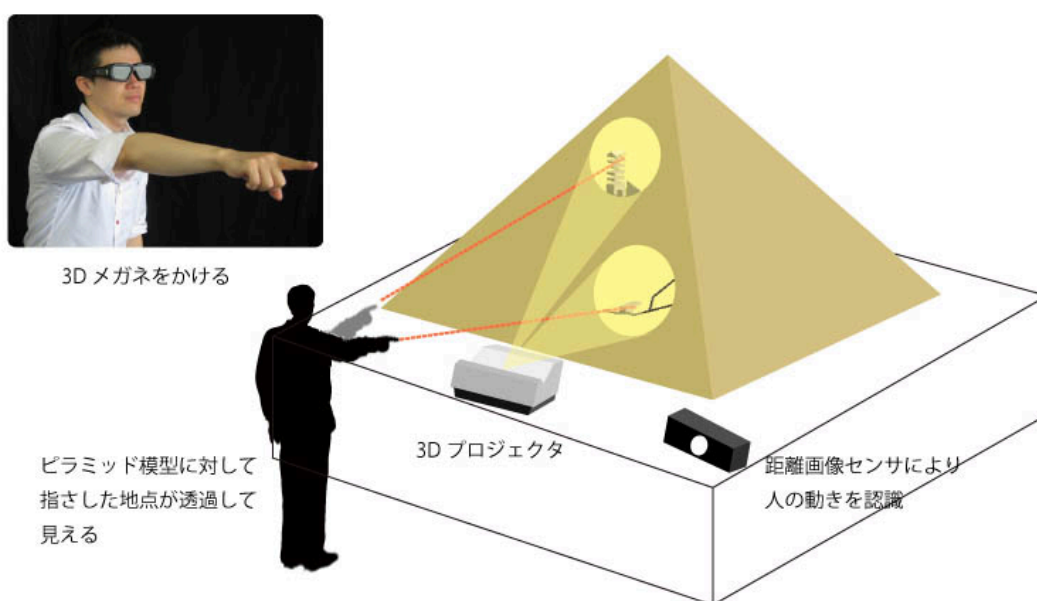


図 4-2 : プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示システム全体図

4.3.2 立体視プロジェクションマッピング

二眼式立体映像の仕組みについて簡単に説明する。二眼式立体映像は人間の視差を利用している。人間の眼は左右に離れているため、右眼と左眼ではモノの見え方が微妙に異なり、この両眼の見え方の違いを「視差」と呼ぶ。人間はこの視差を脳が知覚して空間の奥行きを認識するようになっている。よって、右眼用と左眼用の2つの映像を準備し、右眼には右眼用、左眼には左眼用の映像が入るように制御することで、映像を立体的に見せる事ができる。左右の視差映像を表示するディスプレイ装置と、視差映像が左右それぞれの目にタイミングよく入るように制御する映像分離装置(メガネ)がセットで用いられる。立体視プロジェクションマッピングは、基本的には映画館で使われている3D映画と同じ方法で実現可能である。以下に3D映画の方式を示す。

RealD : 視差映像の分離に円偏光フィルターを使うシステム。円偏光フィルムを貼ったメガネ越しに毎秒 72 コマで特殊なスクリーンに再生された視差映像を鑑賞する。配布できる程度にメガネのコストが安いのも特徴である。

Dolby3D : 視差映像の分離に波長分光フィルターを使うシステム。視差画像をそれぞれ波長の長さを変えて送り、波長分光フィルターメガネをかけて鑑賞する。色の再現度が高く、通常スクリーンでも上映できるが、メガネのコストが高い。

XpanD 3D : 右眼用、左眼用の映像を 1 コマ置きにスクリーンに表示し、液晶シャッターメガネで鑑賞する。液晶シャッターメガネは視差映像と同期して左右のレンズの開け閉めを行うことで、視差映像を分離する。本方式はアクティブシャッター方式、時分割方式とも呼ばれ、立体感が出やすく、ゴーストが少なく鑑賞位置の制限が比較的緩いが、液晶シャッター開閉のための電源供給が必要で構造が複雑になるため、重量が高む上高価となり、光量が不足して画面が暗くなる。

本研究では、立体感が出やすく鑑賞位置の制限が比較的緩い XpanD 3D と同じ時分割方式を使ったプロジェクションマッピングを行うこととし、nVidia 社が提案している液晶シャッターメガネを使った時分割方式の二眼式立体映像規格である「3DVision」を採用した。「3DVision」は左右の視差映像の生成および視差映像を表示するディスプレイ装置と液晶シャッターメガネの同期がハードウェア的に実装されているため、コンテンツ制作側は特に何も意識せずとも立体視プロジェクションマッピングを実施できるという利点がある。具体的には、「3DVision」対応の 3DCG ソフトウェア、グラフィックボード(ワイヤレス液晶シャッターメガネ、USB 接続同期信号発信器付き)とプロジェクタを導入し、グラフィックボードの映像出力フォーマットを「二眼式ステレオ立体映像」に設定し、立体効果の強さを指定するだけである。3DCG レンダリングに使っている Unity3d も「3DVision」に対応している。

立体効果については、図 4-3(a)に示すように、物体の左目映像が左側、右目映像が右側にあり、左右の視線がディスプレイ奥で交差する場合、物体はディスプレイの奥にあるように見え、その逆、図 4-3(c)の場合はディスプレイの手前にあるように見える。図 4-3(b)のように左右の映像が重なっている場合、物体はディスプレイ上にあるように見える。本提案手法ではピラミッド内部を表示するため、図 4-3(a)のように、ディスプレイ奥に物体が見えるよう立体効果を調整した。

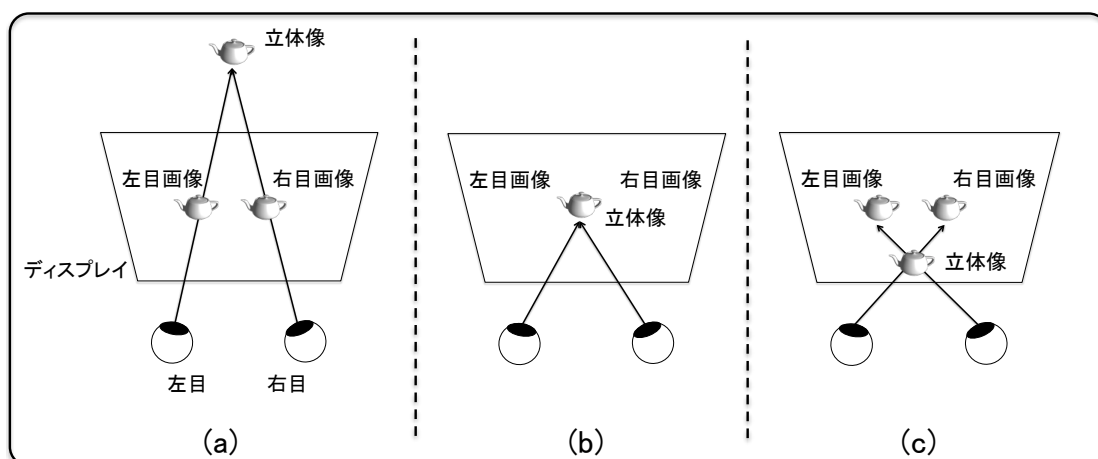


図 4-3 : 立体視による立体効果

4.3.3 ジェスチャ認識

手の位置角度を検知. 腕が向いている地点を特定し, その部分だけが透過して見えるような実装とした. この実装に当たっては大日本印刷株式会社が開発したプロジェクションマッピング UI システム「ウォールプレゼンター」 [36]を利用した. 「ウォールプレゼンター」システムは, 図 4-4 に示すように, Microsoft の Kinect for Windows を使用して手の位置と角度から, 壁のどの部分を指しているかを検出し, プロジェクションマッピングの UI とするシステムである.

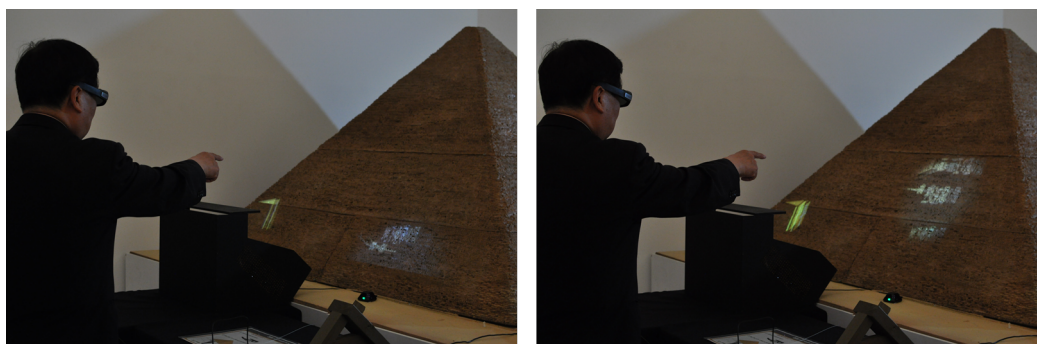


図 4-4 : ウォールプレゼンター

4.4 プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法評価

本システムを古代七つの文明展で実際に運用し、評価を実施した。図 4-5 に本システムを古代七つの文明展で運用した様子を示す。

4.4.1 展示解説コンテンツ

本システムの解説コンテンツは、基本的に「第3章 拡張現実ガイダンスにおける立体的内部構造表示手法」で使用したコンテンツと同じ、ピラミッド内部の大回廊や下降・上昇などの通路、「王の間」や「重力軽減の間」などの部屋をアニメーションで解説するものであるが、立体視プロジェクションマッピングと指差しインターフェースにより、まるでピラミッド内を立体的に透視しているような体験を得られる。また、ある場所を指さすと太陽の船が自分に向かって飛んできて飛び去るというエンタテイメント性の高い隠しコンテンツも用意した。これらのコンテンツは、女子美術大学 内山博子教授、首藤圭介助教らに制作して頂き、システムに組み込んだ。



図 4-5 : プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示システム

4.4.2 システム評価(ユーザテスト)

プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法のヒアリング調査を表 4-1 に示す要領で実施した。

表 4-1 : プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法 ヒアリング調査実施要項

調査日時	2013年9月13日(金) 13時～16時
調査会場	七つの文明展 青森会場 (青森県立美術館:青森県青森市)
観察調査詳細	調査対象:1時間の間に訪れた20名 (小～中学生:11名、3-60代:19名) 展示物近くから12項目の観察調査を実施
ヒアリング調査詳細	調査対象:15名 (女性11, 男性7, 10代5, 30代1, 40代3, 50代4, 60代2, 70代3) 展示物閲覧が終わった来場者に、13項目のヒアリングを実施 観察調査とは別の来場者にヒアリングを実施

調査の設問については、1)「ピラミッド表面に映し出した映像で内部を透視している実感を利用者が得られるか、内部の立体的な構造を正確に把握できるか」、2)「指差しする利用者がどれだけ思い通りに見たい部分をコントロールできるか、その操作方法を理解して簡単に使用できるか」を調査することを主眼に設定した。尚、今回の観察調査結果を表 4-2 に、ヒアリング調査結果を表 4-3 にまとめる。

まず、1)「ピラミッド表面に映し出した映像で内部を透視している実感を利用者が得られるか、内部の立体的な構造を正確に把握できるか」については、ヒアリング調査をした 15 人中 12 人が内部を透視している実感を得られ、内部構造を把握できたと答えており、まずまずの結果だと言える。次に 2)「指差しする利用者がどれだけ思い通りに見たい部分をコントロールできるか、その操作方法を理解して簡単に使用できるか」については、ヒアリング調査では「最初はどうかすれば良いか分からなかったが、そのうち感覚的にわかった」と答え、実際に観察調査をした 20 人中 20 人が操作できており、直感的に操作できるシステムであったと言える。

その他のヒアリング結果をまとめると、「女性はメガネをかけると化粧が落ちてしまう不安がある」「メガネが重いため両手で持ってしまう」といった問題が発生している。今回使用した nVidia 社の 3D Vision 対応液晶シャッターメガネはワイヤレス接続で重量は 50 g と HMD と比較すると軽量だが、それでもまだ抵抗感が高いと言える。また、「3D 酔いをした」と立体視特有の問題も発生している。これは展示解説コンテンツとしては致命的な欠点であると言える。しかしながら、太陽の船が自分に向かって飛んで来る隠しコンテンツを再生した場合、思わずのけぞって避けてしまうなど、それだけ臨場感に富んだシステムだったとも言える。

表 4-2：プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法観察調査結果

		評価:	考察
準備	ジオラマの前で立ち止まるか	1.立ち止まった: 20 2.立ち止まらなかった: 0 3.その他: 0	
準備	指定の場所に立つか	1.立った: 17 2.立たなかった: 3 3.その他: 0	指定の足あと場所よりも前に立つことが多い →机や説明書きが前にあるから?
準備	ピラミッドを指す行動をとるか	1.右手で行った: 19 2.左手で行った: 0 3.取らなかった: 0 4.その他: 1	(それぞれの腕を動かしたユーザあり)
準備	メガネをとるか	1.メガネをかけた: 20 2.メガネを持った(かけなかった): 0 3.取らなかった: 0	メガネをかけるという行為はわかりやすく、ユーザは説明なしでメガネをかけることができる。
準備	(メガネをかけているユーザ) 自分のメガネをどうしたか	1.メガネを外した: 2 2.メガネをつけたまま: 7 3.その他: 0	多くのユーザはメガネをかけたまま着用 メガネを外して3Dメガネをかけても立体的に見えない
準備	指差しとメガネどちらが先か	1.指差し: 20 2.メガネ: 0 3.その他: 0	メガネはかけるものという認識があるが、指差しには認識が無いため3Dメガネをかけてから説明書を見るというユーザもいた。動作について直感性はない
利用中	ピラミッド内に指をさしてコンテンツを動かしたか	1.できた: 20 2.できなかった: 0 3.その他: 0	説明書きを事前に読むユーザがほとんどだったため、コンテンツ操作はスムーズにできていた
利用中	隠しコンテンツに気がついたか	1.表示した: 10 2.表示しなかった: 8 3.その他: 2	隠しコンテンツ表示は偶然発生のものがほとんど。若者ほどゲームで慣れているからか、イベント発生の原因に気付いていた
利用中	何人で同時に体験しようとしたか	1.一人: 17 2.二人: 3 3.三人: 0 4.四人以上: 0 5.その他: 0	反応しないユーザ(子供・車椅子)の場合、付き添いの人が一緒に体験しようとしていた。
利用後	メガネを台に戻せたか	1.できた: 10 2.できなかった: 6 3.その他: 4	
利用後	体験時間はどのくらいか	1.0~5秒: 2 2.5~10秒: 4 3.10秒以上: 12 4.その他: 0	スタート後にすぐにコンテンツが表示される場合、長く体験していただいたが、反応が鈍い場合はすぐに体験をやめてしまうことが多かった。
その他	壁面のポスター、展示台に置いてあるコピーを読んでいたか	1.壁面のポスターを読んだ: 6 2.展示台のポスターを読んだ: 14 3.その他: 0	3Dメガネを手にした後、そのまま展示台に置いてあるポスターを読むことがほとんど。 道具を何も使わないことから、3Dメガネをかけた後に何をしたらよいかかわりにくかった。

表 4-3 : プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法ヒアリング調査結果

ヒアリング項目	評価:	ヒアリング詳細
体験したうち、最も楽しめたコンテンツはどれでしたか？(複数回答有)	1.ピラミッド内: 4 2.舟の移動: 0 3.どれも楽しめなかった: 3 4.どちらも楽しめた: 7	・このような展示を体験したことがなかったため、楽しみ方がわからなかった ・経験したことがない見方ができたというだけで満足 ・舟を出すきっかけに気付かなかった ・立体的な中に見ることが面白い
面白くなかった部分がありましたか？		・動きがわかりにくかった ・もっと広い範囲が見たかった ・複数人で同時にできるとよい
会場壁面、または展示台に置いてあるポスターのわかりやすさはどうでしたか？	1.会場壁面: 2 2.展示台: 4 3.両方: 5 4.どちらもわかりづらい: 0	
ピラミッドの内部構造はわかりやすかったですか？	1.わかった: 12 2.わからなかった: 2 3.どちらでもない: 0	
ピラミッドの内部構造は立体的に見えましたか	1.見えた(12へ): 12 2.見えなかった: 3	・メガネをかけているからか、立体的には見えなかった
部屋はピラミッドの中にあるように見えましたか	1.見えた: 12 2.見えなかった: 2	・そこまで立体的ではない
コンテンツ閲覧方法はすぐにわかりましたか	1.わかった: 14 2.わからなかった: 1	・説明書を読んだらわかった ・最初はわからなかったが、感覚的にわかった ・ 手を出すというのがわからなかった
コンテンツ閲覧時、迷ったこと、疑問に思ったことはあったか	1.あった: 3 2.なかった: 11	・どちらの手を上げればよいかわからなかった ・もう少しはっきり見るとよかった
コンテンツを動かす上で不便や違和感がありましたか？	1.あった: 2 2.なかった: 11	・ 動きのちょっとしたズレが気になった ・ 3D酔をした
同じような機器を使った展示が他にもあれば、見るか	1.見る: 15 2.見ない: 0	
その他何かあれば		・大回廊の様子は一般的な知識であるため、もっと別の方向から見えるなどあれば ・行った場所に応じてミイラが見れる、舟が自由に動かせる(コントロールする)ようなゲーム要素 ・ メガネの上にメガネというのに違和感があるので、度付き対応の3Dメガネがあれば ・タッチすると詳細が見えるようなものができれば ・コンテンツの種類がもっとあれば ・中の映像だけではなく作り方も見れると良い ・メガネ台に「メガネをかけたら手を出してね」と書いてあるとよかった ・ 女性はメガネをかけると化粧が落ちてしまう不安がある ・ メガネが重いので両手で持ってしまう

4.5 制限と今後の課題

立体視とプロジェクションマッピングを組み合わせ、情報提供装置に起因するユーザ体験の問題が発生しにくい展示物内部の立体的内部構造表示手法を実装することができた。しかしながら、提案手法はプロジェクタを利用しているため、明るい場所での利用に制限がある。また、本手法は光を投影するため、僅かながら展示物への攻撃性があり、展示物保護のために光の投影自体が許されない場合には実施できない。また、光を反射・透過する展示物へは実施できない。依然として液晶シャッター眼鏡という情報提供装置が必要な点もマイナスであり、液晶シャッターメガネをかけていない人にとっては二重になった映像が投影されているだけであり、コンテンツを楽しむことができない問題もある。さらに、3D酔いの問題も発生している。これらの問題については次のステップとして、図 4-6 に示すような騙し絵を人の位置に応じてリアルタイムに生成し投影し続けることで、一切の情報提供装置を身につけることなく実現可能な擬似裸眼立体プロジェクションマッピングを実装して解決したい。



図 4-6 : Julian Beever の Pavement Drawing ([37]より引用)

第5章

コンピューテーショナルフォトグラフィ によるグレア除去手法

5.1 背景

展示施設における拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するにあたり、展示環境において発生が予測されるグレアの問題も解決する必要がある。展示施設ではスポットライトのようなライトを使って展示物を照明するが、この光が拡張現実ガイダンスサービスシステムに用いるカメラに直接入射するとグレア(レンズフレア・ハレーション)を生成し、画質を損なうノイズ源となるため、カメラの3次元位置と姿勢を高精度に取得する事が困難となり、さらに、閲覧者からは携帯端末を通して展示物とその解説コンテンツを閲覧する妨げとなる。また、動物園・植物園、水族館といった屋外の展示施設で活用することを考えた際、レンズに付着した水滴にライトの光が入射することでグレアが容易に発生することが予想できる。グレアは画質を著しく損なうため、拡張現実ガイダンスサービスシステムに限らず、監視カメラやテレビ放送のようなカメラを使う分野においてグレアを除去することは重要である。光源からの光がカメラに直接入射することで発生するグレアはカメラのボディとレンズ内部における光の拡散反射現象の結果として生じる(図 5-1(a))。レンズや保護ガラスに付着した水滴の場合、光の拡散反射現象は水滴内部でも発生する(図 5-1(b))。



図 5-1 : グレアの例

グレアの削減にはレンズフードや低反射コーティングレンズが用いられている。レンズフードは視野角外から入射してくる余分な光をカットし、低反射コーティングレンズはレンズ中で発生する光の拡散反射を低減することでグレアを減らしている。しかしながら、レンズフードは輝度の高い光源がカメラの視野角中にある場合には効果がなく、低反射コーティングレンズは高価である上グレアを完全に除去することは出来ない。コンピュータ処理によるグレア除去も各種提案されているが、その手法自体が新たなノイズを発生させたり、カメラ本体の改造が必要であるといった欠点があり、また、グレアを完全に除去することは未だ達成されていない。

レンズや保護ガラスに付着した水滴のような障害物が原因で発生したグレアの除去には原因と

なる水滴を物理的に除去することが有効であり、撥水剤をレンズ表面に塗布したり、ワイパーを使用している。これらの手法は簡単な割に効果が高いが、完全に水滴を除去するものではない。

そこで本章では、カメラレンズを透過する光を制御するための光シャッタを利用し、水滴の付着したレンズ領域を通った光を選択的に除去することによりグレアを除去した画像を生成する手法を提案する。本手法では、光シャッタによりレンズの一部のみを透過した光が結像した画像を、その透過する部位を連続的に変化させながら複数枚取得する。これらの画像列から水滴の付着したレンズ領域で得られた画像を自動的に判定し、それら以外の画像を再合成することにより、水滴によって引き起こされるグレアの除去された画像を取得するものである。

本章では、本手法の原理について述べ、さらに本手法に基づいて試作したグレアを除去することが可能なカメラシステムの構成について説明し、それをを用いた実験結果によって提案手法の有効性を示す。

5.2 関連研究

本章の目的であるグレアの除去に関連した研究として、従来より、雨、雪、霧といった悪天候による画質の劣化を除去する方法が提案されている。例えば、Nayar と Narashimhan は悪天候をモデル化 [38] し、Garg と Nayar は雨滴の測光的なモデルを提唱し [39]、このモデルを用いて動画から雨の除去を行った [40]。これらは、あくまでも悪天候下で撮影された画像の画質改善が目的であり、カメラに付着した水滴によるグレアの除去には効果が期待できない。

一方、カメラの性能向上を図ることで、グレアそのものを減らす方法も検討されている。その方法の一つとして、低反射コーティングレンズの利用が効果的とされており、レンズ内部での拡散反射を低減しグレアを軽減する。Boynton と Kelley は、レンズとカメラ内部での拡散反射を低減するため、液体を充填したカメラを開発した [41]。デジタル画像処理によるグレア除去も各種提案されている。デコンボリューションを用いたグレア除去は Faulkner らによって医学分野に [42]、Starck らによって天文学分野に適用されている [43]。ハイダイナミックレンジイメージ(HDRI)分野においては Reinhrd らによってグレア除去が議論されている [44]。

近年、カメラのハードウェアに付加機能を加えるなどして、撮影方法に工夫を加えて撮影した複数の画像から画像生成を行うことにより、従来のカメラにはない新機能を実現しようとする研究が盛んになってきた。このような画像生成法はコンピュータショナルフォトグラフィと呼ばれ、画像処理、コンピュータビジョンと写真撮影術が融合した新しい分野である。Nayar らは、デジタルマイクロミラーデバイス(DMD)をカメラの光学系に追加し、これをプログラム制御することにより、HDRI、特徴点抽出、物体認識といった多様な画像処理機能を実現した新しいイメージングシステムの概念を構築した [45] [46]。Zomet と Nayar は、レンズの代わりにコントロール可能な絞りをを用いたレンズレスカメラを開発し [47]、Nayar と Branzoi は LCD パネルをカメラの前に設置することで、カメラのダイナミックレンジを拡張できることを示した [48]。

Veeraraghavan らは符号化絞りを使用したカメラを開発し、撮影した画像のリフォーカスを行っている [49]. Talvala らはグレアの除去にコンピュータショナルフォトグラフィ手法を用いた [50]. 彼らはレンズとカメラボディの内部構造に基づき設計したマスクパターンをレンズ前面に設置し、レンズ外部からの直接入射と間接入射を選別することでグレアを除去した. しかしながら、彼らの手法は固定したマスクパターンを利用するため、状況によって場所の変化する水滴により発生するグレア除去には適用できない. Raskar らは一般的なグレアを減少・強調する手法を開発した [51]. 彼らはイメージセンサの前に符号化したマスクを設置し、カメラ内部での光の伝播についてレイトレーシングを行うことで、グレアを減少・強調している. この手法は、1枚の画像があれば充分である非常に実用的な手法であるが、カメラ本体内部の大幅な改造が必要であり、また、レイトレーシングに多大な処理能力を必要とする.

上記の研究に対して、画像加工ソフトウェアを用いてグレアを除去する方法も考えられる. 実際に画像加工ソフトウェアを用いてグレア領域を手動で指定、輝度とコントラストを調整することでグレアの除去を試みた結果を図 5-2 に示す. 図 5-2(a)に示すグレアを、図 5-2(b)ではある程度軽減できているが、完全に除去するには多大な労力が必要となる. また、この例ではグレアはレンズに付着した水滴により発生しているため、グレアを特定することが容易であるが、照明光がカメラに直接入射して発生するグレア(例: 図 5-1(a))の場合、照明とグレアの切り分けは非常に難しい問題である.



図 5-2 : 画像加工ソフトウェアによるグレア除去の例

他にも、カメラ内部構造・レンズ・水滴の正確な形状をコンピュータ内に再構築し、イメージセンサに入射した光の軌跡を遡ってレイトレーシングすることで入射光を再構築し、ここからグレアを引き起こす光成分を除去することも理論上可能ではある. しかし、実際には水滴の正確な形状を得ることが困難であり、また、カメラ内部構造・レンズについても製品ごとの微小なバラつきがあるため、グレアが除去できるほど正確なレイトレーシングを行うことは事実上不可能である.

なお、レンズ前方に設置された保護ガラスに付着した水滴による画像の乱れを除去する研究が

Fukuchi ら [52]によって提案されているが、この研究では、保護ガラスと一体で回転する首振りカメラから得られた時空間断面画像上の軌跡の違いから水滴領域を検出し、その領域に対して画像修復手法を利用するものであり、レンズと保護ガラスにある程度の距離が必要である。つまり、本研究で対象としているような、レンズの直前に付着した水滴により広範囲に発生するグレアの除去には有効な手法ではなく、また、カメラを回転させることで水滴と光源の相対位置が変化し、グレアの発生具合が変化するため、水滴領域の特定も困難である。

上記の関連研究に対して、本研究で提案する手法では、水滴により生じるグレアを除去するために、パターンの制御が可能な光シャッターをレンズ前面に設置し、光シャッター開閉パターンを変化させながら撮影した複数の画像から、水滴を通らないで撮影された画素を自動的に選択することで、水滴によるグレアの影響を除去した画像を生成するという、新しい方法となっている。従来手法と異なり光シャッターをレンズ前面に設置すればよいため、市販のデジタルカメラに広く適用でき、また、多くの処理能力も必要としないシンプルかつ低価格で実践的な手法である。

5.3 グレア発生メカニズム

カメラでは、物体から放射される光線群がレンズに入射し、イメージセンサの特定の位置に集まる(結像)ことにより画像が生成される(図 5-3(a)参照)。つまり、撮影対象の点 A から入射してくる光はレンズで屈折し、イメージセンサ上の点 B に集まることにより、A 点の色がイメージセンサの B 点の画素値として観測されるのである。カメラの撮影範囲中にスポットライトや太陽光のような輝度の高い光源がある場合、光源からの光がレンズ内、カメラボディ内で乱反射してイメージセンサに入射し、グレアとなる(図 5-3(b1)参照)。また、レンズに水滴が付着している場合は、光源からの光が水滴内で乱反射してイメージセンサに入射するため、より容易にグレアが発生する(図 5-3 (b2)参照)。また、撮影対象上の点 A から入射してくる光も水滴により屈折・拡散するため、ブラーや歪みを発生する原因となる(図 5-3(c))が、レンズに付着した水滴により屈折・拡散した光がイメージセンサに入射する量は極少量であるため、水滴によるブラーや歪みはほとんど知覚できないレベルである(図 5-4(a))。しかしながら、水滴が付着した場合は光源の影響を受けやすいため、グレアは容易に発生し、画像の品質を損なう(図 5-4(b))。他方、レンズに不透明な物体が付着した場合でも、不透明物体が付着していないレンズの部位が光をイメージセンサに伝播させるため、イメージは多少暗くなるものの、撮影は可能である(図 5-3(d)参照)。つまり、グレアが発生しているレンズ領域を通った光を選択的に除去することでグレアを除去した画像を生成することが可能である。そこで、本研究で提案する手法では、グレアが発生しているレンズ領域を特定し、特定したレンズ領域の光をブロックする機能をカメラに追加することにより、グレアを除去する。次の章にて、グレアの発生しているレンズ領域を特定し、特定したレンズ領域の光をブロックする方法について説明する。

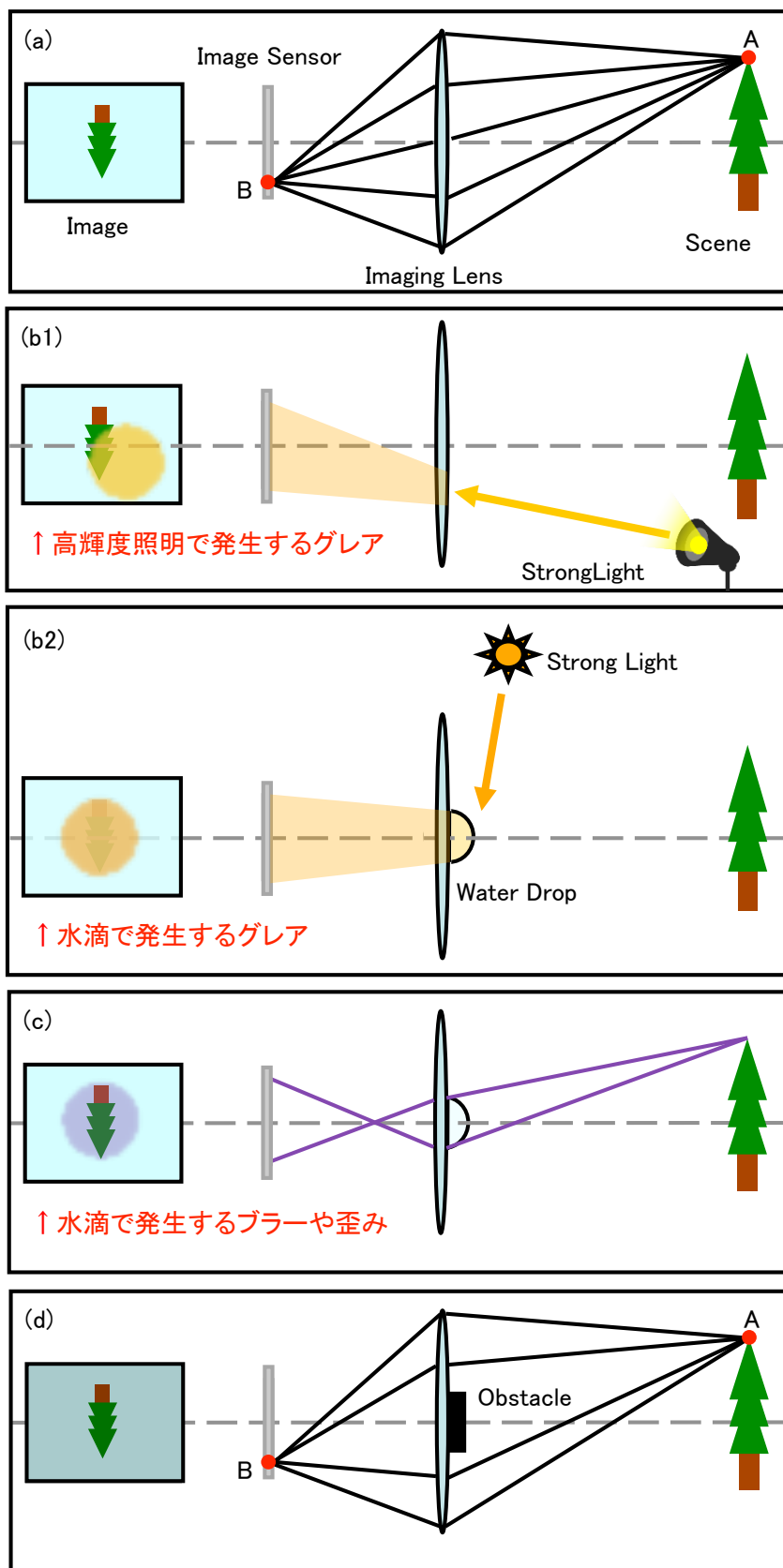


図 5-3 : カメラ光学系の概念図

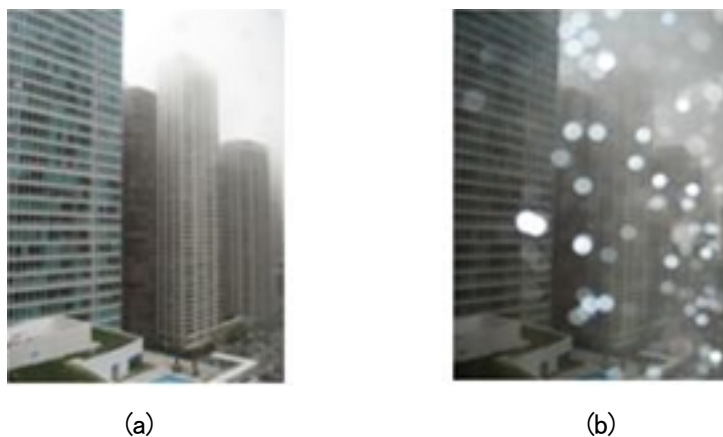


図 5-4 : 水滴によるグレアの例

5.4 水滴由来グレア発生領域特定とグレア除去

本手法では、まずグレアが発生している領域を推測しやすい水滴由来グレアの発生領域特定とグレア除去について議論する。グレアが発生しているレンズ領域を特定し、特定したレンズ領域の光をブロックする機能をカメラに追加する手段として光シャッタアレイを用い、図 5-5 に示すようにレンズ前面に設置する。この光シャッタは、 $N \times N$ 個の 2 次元アレイになっており、それぞれの光シャッタの開閉の制御をコンピュータから自由に行うことができる。

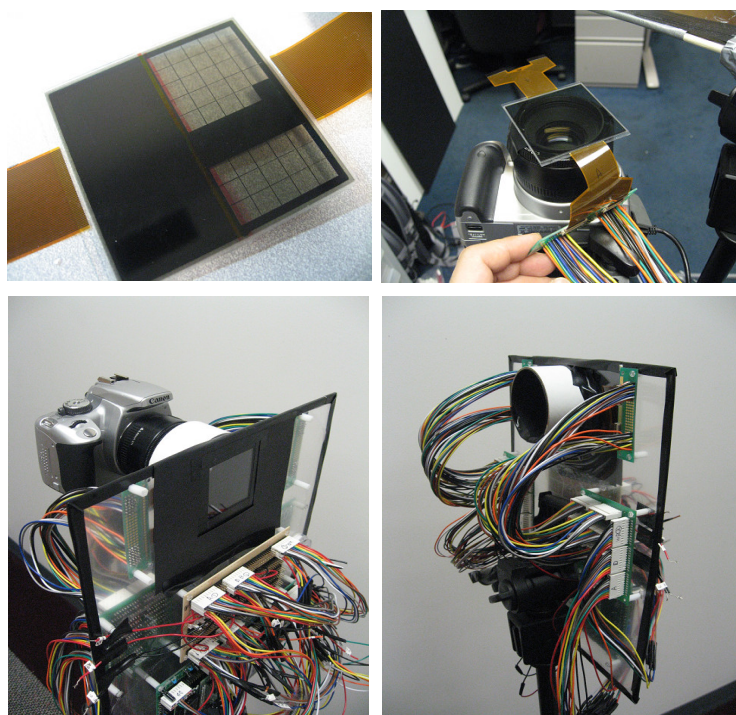


図 5-5 : グレア発生領域特定, および除去システム全体図

5.4.1 システムデザイン

本研究で構築したプロトタイプシステム(図 5-5)では、光シャッターとしてノーマリーホワイト LCD パネルを使用した。ノーマリーホワイトとは、電圧を印加していない間は透明となる LCD パネルである。LCD パネルのサイズは一般的に市販されているデジタル一眼レフ用レンズを想定して $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 、光シャッター 1 個のサイズは $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ とし、 $N=10$ のアレイを開発した。本システムは光シャッターアレイ、光シャッターアレイを駆動する駆動装置、デジタルカメラと PC で構成される。光シャッター駆動装置は、全体を制御する PC ソフトウェアからの指令を受け、それぞれの光シャッターの開閉を制御する。カメラは、10.1 メガピクセルの Canon 社製 EOS Digital Rebel XTi デジタル一眼レフカメラボディに Canon 社製 EF50mm f = 1.8 レンズを組合せて使用した。光シャッターを使うシステムには、キャリブレーションを必要としないという利点がある。単に光シャッターをレンズの前に設置するだけで、自動的にグレア発生位置を特定し除去することができる。以下に光シャッターを用いたグレア発生位置特定方法と除去について述べる。

5.4.2 グレア発生領域特定

レンズ直前に設置した光シャッターを順番に一つずつ開閉しながら撮影を行うことで光シャッター $N \times N$ 枚分の画像を取得する。図 5-6 に示すように、水滴が付着した部位の光シャッターを開けて撮影した画像は水滴により引き起こされたグレアの影響を受けて輝度が高くなる(図 5-6(d))。反対に水滴の付着していない部位の光シャッターを開けて撮影した画像は相対的に輝度が低くなるため(図 5-6(b)(c)(e)(f))、それぞれの画像を比較することで水滴の付着位置を特定できる。具体的には、グレアを含む輝度の高い画像を特定するため、画像をグレイスケールに変換した後、各画像ごとに輝度値の標準偏差 s ならびに輝度平均値 m を求める。標準偏差 s ならびに輝度平均値 m が大きい場合、その画像はグレアの影響を受けた明るい領域を持つことを意味し、小さい場合は明るい領域を持たないことを意味する。得られた $N \times N$ 枚の画像から標準偏差 s と輝度平均値 m をそれぞれ求めた後、グレアを含む輝度の高い画像を特定するために標準偏差 s と輝度平均値 m の閾値 s_t と m_t を計算する。閾値決定には大津の方法 [53]を用いた。大津の方法は、ある値の集合を二クラスに分類する場合の適切な閾値を自動的に決定する手法で、二つのクラス内の分散とクラス間の分散を考え、クラス内分散はできるだけ小さく、クラス間分散はできるだけ大きくなるような閾値を求めるものである。大津の方法で求めた閾値 s_t と m_t より標準偏差 s ならびに輝度平均値 m が大きい場合、その画像は水滴により発生したグレアの影響を受けている。これにより水滴の付着位置を特定可能である。また、標準偏差 s ならびに輝度平均値 m が大きいほど、その光シャッター領域は水滴による影響が大きいといえる。

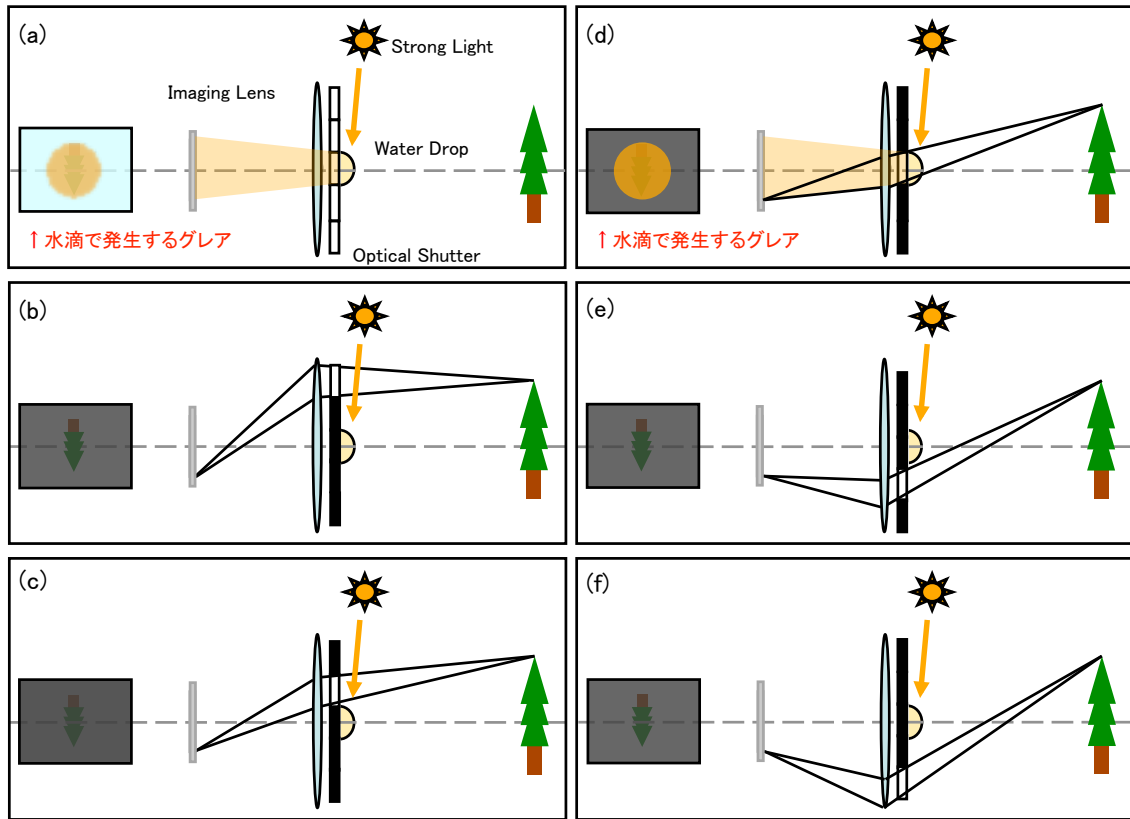


図 5-6 : 水滴付着位置検出

図 5-7 に水滴付着位置の特定実験結果を示す. この実験で図 5-7 (a)に示すように, 光シャッター番号 45 番と 55 番の間に水滴を置いた. 100 個の光シャッターを順番に開閉して撮影した結果が図 8(b)である. 図 5-7 (c)(d)(e)はそれぞれ光シャッター番号 45 番, 55 番, 56 番を開いて撮影した画像である. 光シャッターの前に水滴がある 45 番と 55 番の画像はグレアの影響で輝度が高く, 水滴がない 56 番はグレアの影響を少ししか受けないため, 比較的輝度が低いことがわかる. 図 5-7 (f)と(g)は各光シャッターより得られた画像の輝度の標準偏差 s と平均値 m を各光シャッターの位置にプロットしたもので, 値が大きくなるにつれ青→赤→黄と変化する. また, 大津の方法で算出した閾値 s_t と m_t も合わせて表示している. この図より水滴付着位置を正しく特定できていることがわかると同時に, 水滴がレンズに与える影響の範囲も読取ることができる.

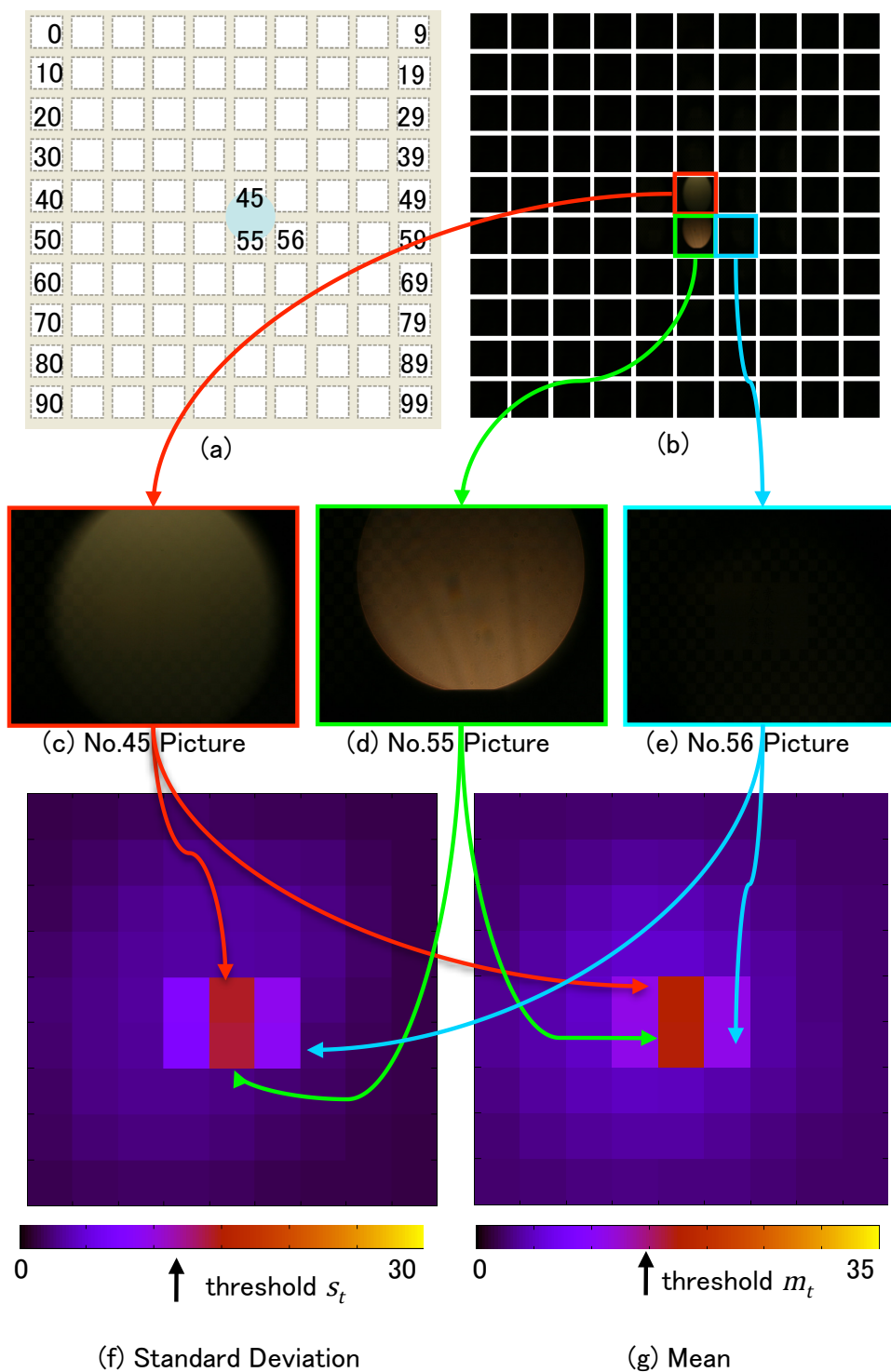


図 5-7 : 水滴付着位置特定実験結果

5.4.3 グレア除去

特定された水滴付着位置の光シャッターを閉じることにより、障害物で拡散された光はイメージセンサに到達しない。つまり、水滴が付着している光シャッターを閉じ、水滴の付着していない光シャッターのみを開いて撮影することで、グレアのないクリアなイメージを得ることができる(図5-8参照)。また、水滴位置特定用に撮影した100枚の画像のうち、水滴の影響を受けていない画像を単純に加算することでグレアのないクリアなイメージを得ることも原理的には可能であるが、実際にはデジタルカメラ特有の固定パターンノイズやランダムノイズといったノイズが加算・蓄積されてしまうため、良い結果を得ることができなかった。

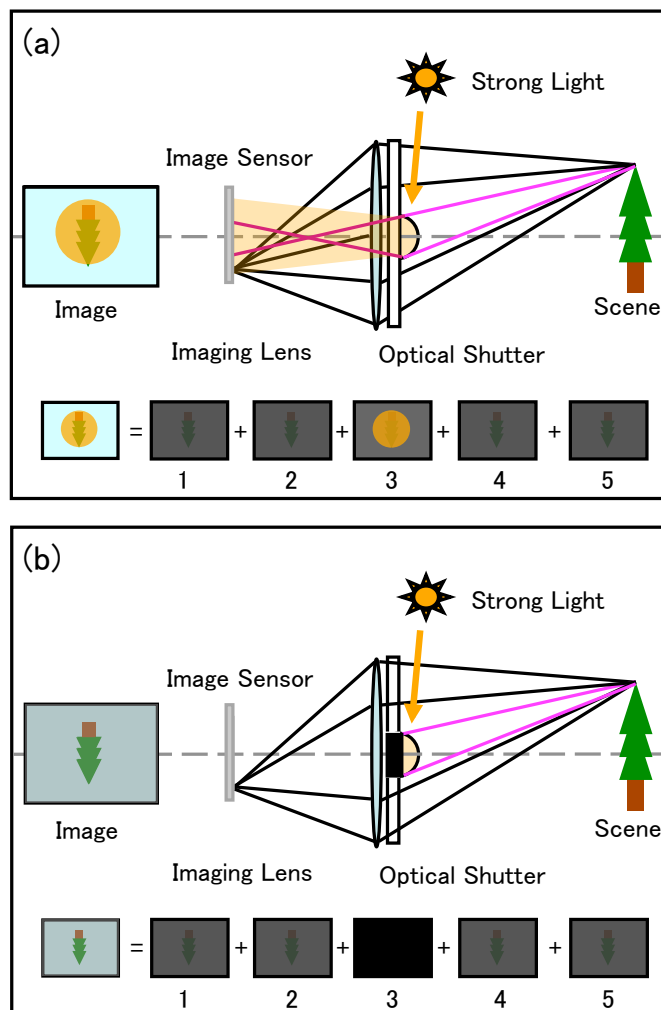


図 5-8 : グレア除去手順

5.5 検討

5.5.1 システム評価(実験結果)

本手法により水滴により発生するグレアを除去できる。図 5-9(a)に実験装置の標準的な構成を示す。本来は雨天や水辺といった水滴がレンズに付着する環境下で実験すべきであるが、本実験装置が防水仕様となっていないため、レンズの前に設置した光シャッタアレイにガラス棒で水滴を付着させながら実験を行った(図 5-9(b)(c)(d))。

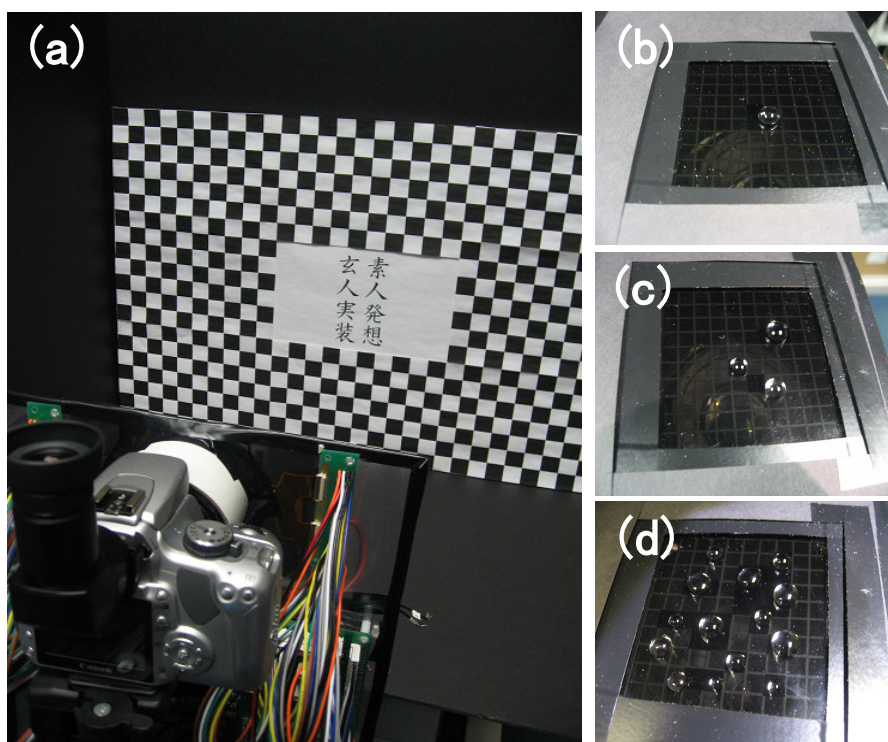


図 5-9 : 標準的な実験装置のセットアップ

図 5-10 に光シャッタアレイに 1 個の水滴を付着させ、晴天下において実験を行った結果を示す。この場合、グレアは太陽光が水滴に入射することで発生している。図 5-10 (a)は水滴除去前の画像であり、水滴由来のグレアが発生していることが確認できる。図 5-10 (b)は本研究にて提案している手法を用いて水滴由来のグレアを除去した結果であり、図 5-10 (c)は水滴がない状態、つまり、水滴由来のグレアが発生しない状態で撮影したものである。これらを比較すると水滴由来グレアが提案手法により除去されていることがわかる。図 5-10(d)は各光シャッタより得られた画像の輝度の標準偏差 s を各光シャッタの位置にプロットしたものであり、光シャッタアレイに付着した水滴の位置とレンズに与える影響の大きさを表している。

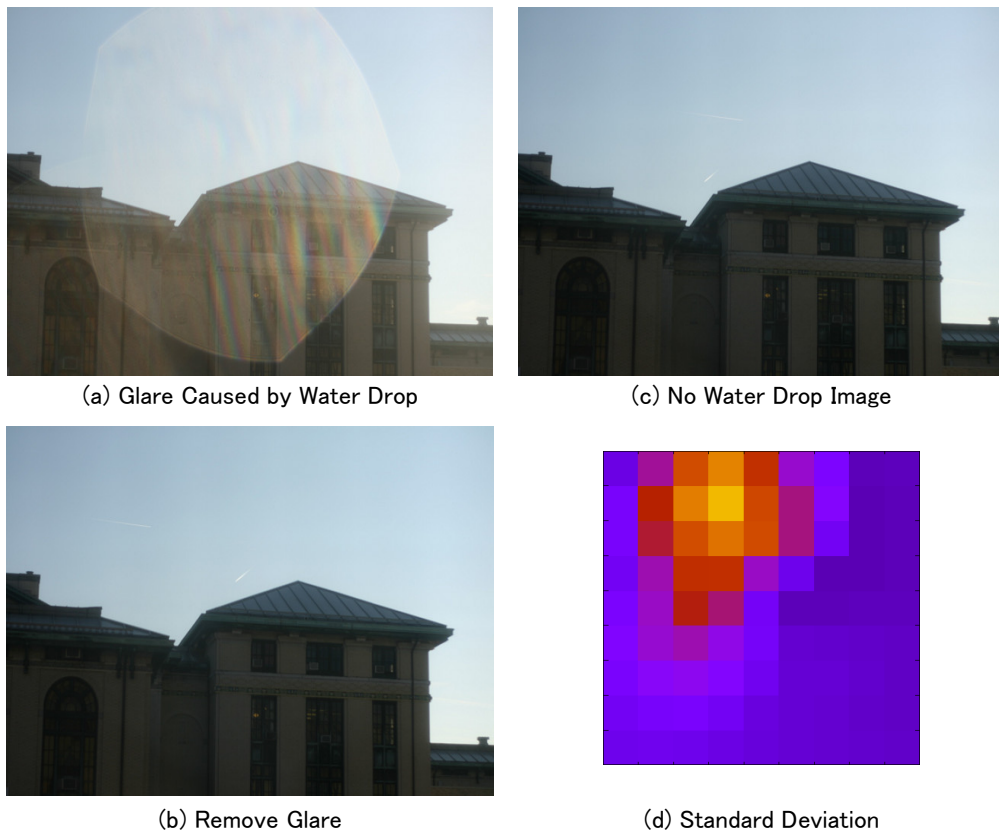


図 5-10 : 実験結果

図 5-11 に環境を変えて実験した結果を示す. 左端の列は水滴除去前の画像, 左から 2 番目の列は本研究にて提案している手法を用いて水滴由来のグレアを除去した結果, 3 番目の列は水滴がない状態, 右端の列は各光シャッターより得られた画像の輝度の標準偏差 s を各光シャッターの位置にプロットしたものである.

図 5-11 (a)(b)は室内での実験結果である. 図 5-11 (a)では 1 個の水滴を光シャッターアレイに付着させ(図 5-9 (b)参照), 天井に設置された蛍光灯の光が水滴に入射することでグレアが発生している. 図 5-11 (b)では 14 個の水滴を光シャッターアレイに付着させ(図 5-9(d)参照), 蛍光灯に加えて高輝度 LED ライトをカメラの画角の外から水滴に対して照射することでグレアが強く現れるように調整したが, グレアは問題なく除去できている.

また, 図 5-12 は 9 個の水滴を光シャッターアレイに付着させた際, 実際に閉じた光シャッターを示しているが, 水滴の位置と閉じたシャッターの位置, すなわちグレアが発生している位置が異なっていることがわかる. このことより, 水滴の位置を他の手段で検出し, その位置の光シャッターを閉じるだけではグレア除去が出来るわけではないことも分かる.

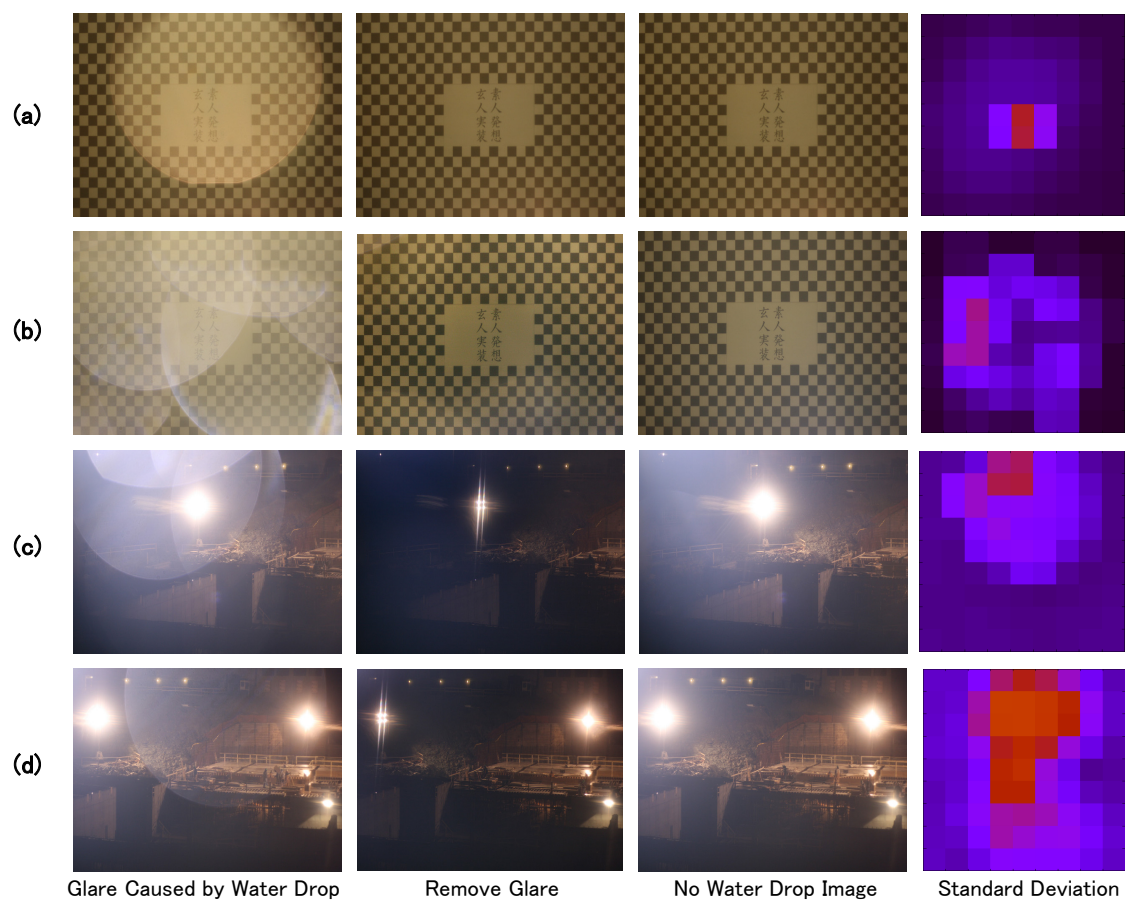


図 5-11 : 環境を変えた場合の実験結果

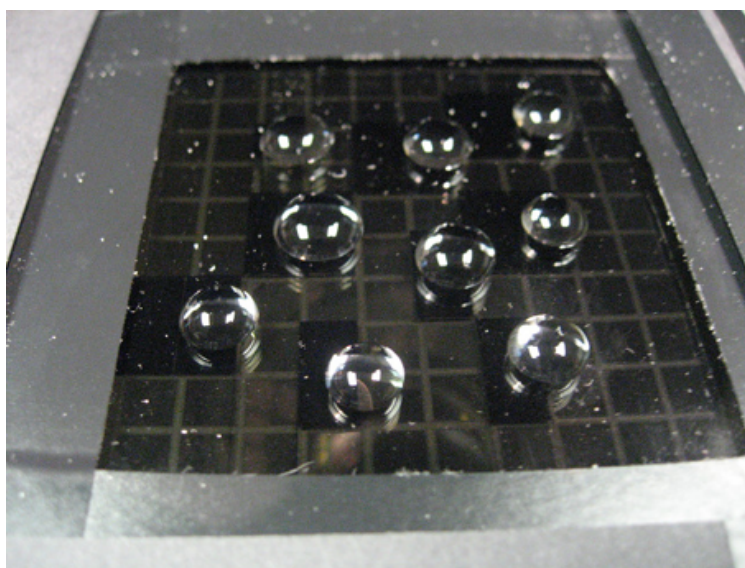


図 5-12 : 本手法で検出したグレア発生領域(光シャッターが閉じている領域)

表 5-1 はそれぞれのカメラセッティングと処理時間を示している。一枚の写真を PC に転送するのに約 1 秒を必要とするため、全処理時間は 1 秒×100 枚+露光時間×100 枚となる。撮影画像から水滴付着位置を特定するのに必要な処理時間は約 5 秒ほどである(Panasonic Let'sNote CF-Y7, CPU 1.2GHz CentrinoDuo, 2GBRAM, WindowsXP)。本実験では、100 秒以上という処理時間となったが、上記のように、その大半は画像を PC に転送する時間であり、この時間については装置構成の改善により無視できるレベルに短縮可能である。提案手法の原理的に必要な時間は、100 枚の画像の露光時間と、処理時間だけであり、それらを合計すると約数秒でグレア除去が可能になると期待できる。カメラ内の標準化と量子化のため、異なる時刻で撮影した画像間でピクセルのずれが発生することが予想されるが、提案手法では各画像の輝度値の標準偏差と輝度平均値を用いるため、ピクセルのずれによる影響は無視できるものとする。

表 5-1 : カメラ設定と処理時間

	Total Processing time (sec)	Exposure time (sec)	F Value	ISO
a	108.3	1/25	1.8	400
b	108.5	1/25	1.8	400
c	105.1	1/800	2.5	100
d	108.3	1/25	1.8	400
e	108.2	1/25	1.8	400

5.5.2 輝度の高い光源由来のグレア発生領域特定とグレア除去

ここまで、グレアが発生している領域が推測しやすい水滴由来グレア領域の特定とグレア除去について議論してきたが、ここで、輝度の高い光源がある場合に、光源からの光がレンズ内、カメラボディ内で乱反射してイメージセンサに入射し、グレアとなる場合について議論する。展示施設では展示物の演出のために指向性の高いスポットライトを用いることが多く、また、動物園、植物園、水族館といった屋外の展示施設でも高輝度な照明を用いることが多いため、輝度の高い光源によるグレア発生も頻度が高いと考えられる。図 5-11(c)(d)はそのような状況に近い夜間屋外での実験結果である。夜間の工事現場を撮影したものであり、図 5-11 (c)では 3 個の水滴を、図 5-11 (d)では 1 個の水滴を光シャッターアレイに付着させたが、設置された高輝度な投光機の影響により水滴由来のグレアだけでなく、輝度の高い光源由来のグレアも発生している。ここで、水滴の付着していない画像と水滴によるグレアを除去した画像を見比べると、水滴由来のグレアだけでなく、シーン中の明るい光源により発生したグレアも減少していることがわかる。つまり、本手法は水滴由来のグレアだけでなく、レンズとカメラボディ中の乱反射により発生するグレア

除去へも応用が可能だと考えられる。

これを確認するために、図 5-13 に示す実験を行った。図 5-13 (a)では高輝度 LED ライトをシーン中に設置し、グレアを発生させている。これにグレア除去手法を用いた結果が図 5-13 (b) であり、グレアを軽減できていることがわかる。図 5-13 (c)は高輝度 LED ライトをシーン中から撤去し、グレアが発生しない状態で撮影したものである。本追加実験では、水滴の場合と同様にして、収集した $N \times N$ 枚の画像について、画素毎に上記と同様にして閾値処理を施し、水滴領域を特定するのと同様な処理を行った。この結果得られた領域は、図 5-13(d)に示すようにレンズの特定の領域で、グレアが強く発生していることを示している。これは、グレアの原因となるレンズとカメラボディ内の乱反射の大半がこのレンズ領域に重点的に発生していることを意味していると考えられる。このため、水滴によるグレアと同様に、その領域の画像を除去することにより、グレアが軽減されたものと考えている。グレアを完全に除去できていないのは、光シャッタの遮光率が低く、グレアが発生領域の入射光を遮断できていないためだと考えられる。また、図 5-13 に示す実験時に、レンズのグレア発生領域を目視で特定することはできなかった。つまり、画像認識的な手段でグレア発生領域を特定することは困難だと考えられる。

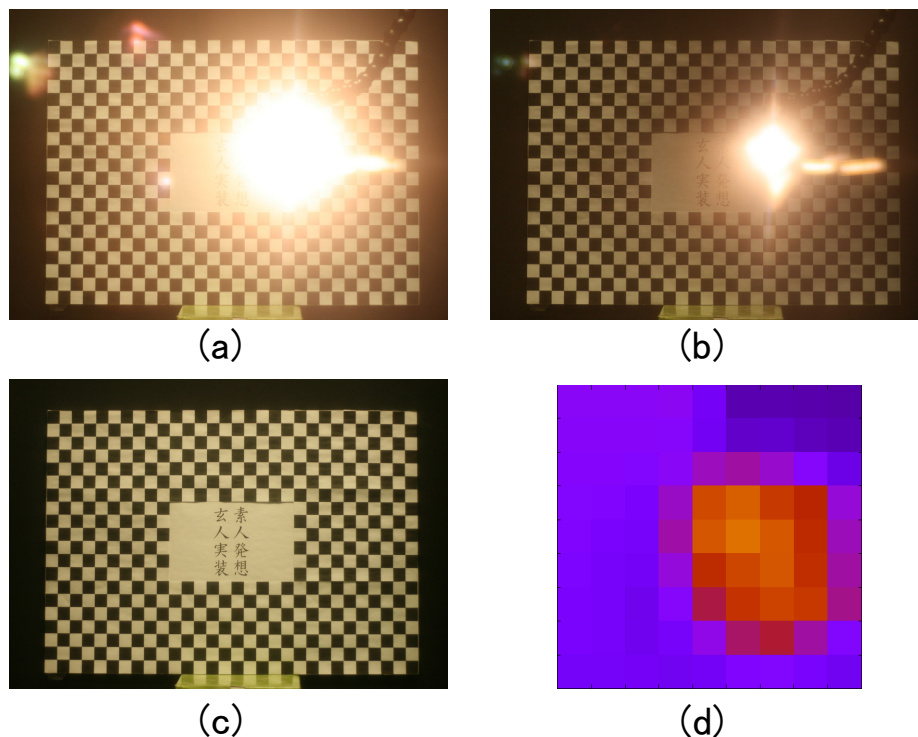


図 5-13 : 輝度の高い光源由来のグレア除去実験

5.5.3 制限と今後の課題

実験により本手法によりグレア除去が可能であることを実証できたが、提案手法にはいくつかの制限がある。最大の制限は装置が大型化してしまい、タブレットやスマートフォンといった携帯端末への適用が現時点で難しいことである。制御回路の1チップ化による小型化も検討したが、後述する好適な光シャッタの調達問題と合わせ、費用的に現実的ではなかったため、実現には至らなかった。

他の制限としては水滴付着位置を特定するために光シャッタ数分の写真撮影を必要とすることが挙げられる。これにより、本手法はスタティックなシーンにしか適用できず、水滴の増減、移動、変形にも対応できない。また、光シャッタ全体が水滴に覆われた場合も対応できない。光シャッタアレイはレンズの直前に設置する必要がある、さもないと光シャッタアレイそのものが撮影画像中に現れてしまう。

また、光シャッタとして使用している LCD パネルの光透過性が 40%程度と低い上、水滴が付着している位置の光シャッタを閉じるため、得られる画像が暗くなる問題もある。さらに LCD パネル自体が光を拡散する性質を持っているため、撮影画像の品質を損なう問題もある。例えば、図 5-11(c)(d)に見られるように光源周囲にスターパターンが生成されてしまう。

なお、本実験では、光シャッタとして用いている LCD の遮光率が低い(約 10%)ため、輝度の高い光源由来のグレアを完全に除去できていないが、より好適な光シャッタデバイスを開発できればこの問題は解決すると考えられる。また、本研究では光シャッタをレンズ前面に設置したため、光シャッタがレンズの保護ガラスとしても機能しているが、光シャッタをレンズ内に電子絞りとして組込んで同様の結果が得られるものと考えられる。

本章において光シャッタアレイを使用し、グレアを引き起こすレンズの位置特定手法とグレア除去手法の原理を提案した。提案手法は市販されているデジタル一眼レフカメラ等の大型撮像装置であれば実現可能であるが、タブレットやスマートフォンといった携帯端末への適用は現時点では難しい。また、本手法は動的なシーンに対応しておらず、さらに、光シャッタとして LCD を用いているため得られる画像が暗くなってしまいう問題がある。理想的な光シャッタデバイスはまだ開発されていないが、次のステップとしてデジタルマイクロミラーデバイス(DMD)を光シャッタとして利用することを考えている。DMD は LCD と比べると遮光率、透過率、応答速度全てに優れるため、現在の問題はかなり改善できるものと期待している。しかしながら、DMD はより多くのスペースが必要であり、高価であることが問題となる。また、LCD 光シャッタをレンズ内に電子絞りとして組み込む場合についても検証を行いたい。現時点で本手法における制限は多いが、将来的には動的なシーンにおけるグレア除去も達成し、LED をマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステムへの組み込みは勿論、監視アプリケーションやテレビ放送といった分野への応用も進めていきたい。

第6章

結論

6.1 本研究の成果

本研究では、展示施設における拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するための課題を解決する手法を提案した。そして、提案手法により実際の展示会で運用可能なシステムを構築し、実際に一般公開することによりその実用性を検証した。具体的には、美観をなるべく損なわず、情報提示ポイントであることが直感的に理解でき、展示物の特徴に左右されず、光量が十分確保できない環境下でも利用可能な拡張現実ガイダンスサービスシステムとして、「LEDをマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム」を提案した。また、展示物内部の立体的な情報を提供する手法として、携帯端末による展示物内部の立体的な構造表示手法である「拡張現実ガイダンスにおける立体的内部構造表示手法」及び、情報提供装置に起因するユーザー体験の問題が発生しにくい展示物内部の立体的内部構造表示手法である「プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法」を提案した。さらに、展示施設で利用されるライトやカメラレンズに付着する水滴が原因となり発生が予見されるグレアを除去するための「コンピュータショナルフォトグラフィによるグレア除去手法」を提案した。本研究で提案した手法により、展示施設における拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化可能であることを実証することができた。今後、実用的な拡張現実ガイダンスサービスシステムが展示施設において展示物を鑑賞する人に様々な発見や刺激、感動をもたらし、人と展示物との豊かなコミュニケーションが促進されることが期待できる。以下に本研究の成果の詳細をまとめる。

LEDをマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム

美観をなるべく損なわず、情報提示ポイントであることが直感的に理解でき、展示物の特徴に左右されず、光量が十分確保できない環境下でも利用可能な拡張現実ガイダンスサービスシステムとして「LEDをマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステム」を提案した。これは発光体から携帯端末のカメラの3次元位置と姿勢を安定的かつ高精度に取得することで実現した。通常、検出した発光体を特徴点として射影変換によりカメラの姿勢を推定するためには4個以上の発光体が必要であるが、本手法では加速度センサを併用することで、発光体2個以上が撮影範囲内にあれば推定可能となっており、結果として処理の高速化も図れている。利用者の操作によっては発光体全てがフレームアウトする場合も考えられるが、ジャイロセンサからの相対的な回転角度を取得することで解説コンテンツ再生を継続している。これによりマーカー位置を気にすることなく、動的なコンテンツ表現を実施することが可能になった。ユーザーテストにより、実際の美術館や博物館といった展示施設において、本手法が有効であることを示した。

拡張現実ガイダンスにおける立体的内部構造表示手法

携帯端末を用いて展示物内部の立体的な情報を提供する「拡張現実ガイダンスにおける立体的内部構造表示手法」を提案した。従来の拡張現実ガイダンスサービスシステムは展示物の手前に

解説コンテンツを合成表示するものが多かったが、ユーザテストの結果から、展示物の内部構造を観察したいという要望が多いことが分かった。この問題に対し、展示物の物体内部を立体的に透過表現する手法を提案した。本手法は、展示物を撮影した映像と提示する情報を適切な透過度と順序で合成することにより、展示物の内側に立体的な内部構造が存在するかのように見せる手法である。ユーザテストにより、実際の美術館や博物館といった展示施設において、本手法が有効であることを示した。

プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法

情報提供装置に起因するユーザ体験の問題が発生しにくい展示物内部の立体的内部構造表示手法である「プロジェクションマッピングによる立体的内部構造表示手法」を提案した。ユーザテストの結果から、携帯端末による展示物内部構造の透過表示手法は立体感に乏しい場合があることが分かった。また、情報提供装置が重い・手を出しづらいといったユーザ体験の問題は解決できていない。これらの問題に対し、立体視とプロジェクションマッピングを組み合わせた情報提示手法を提案した。本手法は立体視用の視差映像を展示物に直接投影(プロジェクションマッピング)し、液晶シャッター眼鏡を通して見ることで、展示物の内部構造を立体的に透過表現する。液晶シャッター眼鏡は従来の携帯端末や HMD といった情報提供装置と比較すると軽量かつケーブル接続が不要であり、情報提供装置に起因するユーザ体験の問題が発生しにくく、展示会場において使いやすいメリットもある。また、本手法はジェスチャ認識機能を追加実装しており、利用者が指差した箇所を選択的に透過表示することでインタラクティブ性を高めている。ユーザテストにより、実際の美術館や博物館といった展示施設において、本手法が有効であることを示した。

コンピューショナルフォトグラフィによるグレア除去手法

展示施設で利用されるライトやカメラレンズに付着する水滴が原因となり発生が予見されるグレアに対し「コンピューショナルフォトグラフィによるグレア除去手法」を提案した。展示施設ではスポットライトのようなライトを使って展示物を照明するが、この光が拡張現実ガイドシステムに用いるカメラに入射するとグレア(レンズフレア・ハレーション)を生成し、画質を損なうノイズ源となるため、カメラの3次元位置と姿勢を高精度に取得する事が困難となり、さらに、閲覧者からは携帯端末を通して展示物とその解説コンテンツを閲覧する妨げとなる。また、動物園・植物園、水族館といった屋外の展示施設で活用することを考えた際、レンズに付着した水滴にライトの光が入射することでグレアが容易に発生することが予想できる。そこで、ライトからの入射光やレンズに付着した水滴により発生するグレアといった映像品質の劣化問題をコンピューショナルフォトグラフィ手法により解決した。本手法はレンズを透過する光を制御するための光シャッターをレンズ前面に設置し、光シャッターでグレアが発生している領域を選択的に閉鎖することにより、グレアを除去した画像を生成するものである。具体的には光シャッターによりレンズの一部のみを透過した光が結像した画像を、その透過する部位を連続的に変化さ

せながら複数枚取得する。これらの画像列からグレアが発生しているレンズ領域で得られた画像を自動的に判定し、それ以外の画像を再合成することにより、グレアを除去した画像を取得した。実験により、本手法がグレアを除去できることを示した。

6.2 今後の研究課題

拡張現実ガイダンスサービスシステムの実用化に向けた今後の取り組み

1.2節でも述べたように、数多くの拡張現実ガイダンスサービスシステムが提案され、展示施設に導入されている事例もあるが、そのほとんどが実証実験や話題作りのための短期運用に留まっており、まだ実用化されるまでには至っていない。そこで、本研究では展示施設における拡張現実ガイダンスサービスシステムを実用化するための課題を解決する手法を提案、実際の展示会で運用可能なシステムを構築し、実際に一般公開することによりその実用性を確認したが、拡張現実ガイダンスサービスシステムの実用化には技術的な課題以外にも解決すべき課題がある。技術課題以外の実用化に向けた課題としては拡張現実ガイダンスサービスシステムの初期構築・導入費用、拡張現実ガイダンスサービスシステムの運用費用、展示物入れ替えやガイダンス機材更新に伴う拡張現実ガイダンスアプリ・解説コンテンツのメンテナンス費用、といった維持管理コストがあげられる。この維持管理コストを削減するために、例えば展示施設共通の拡張現実ガイダンスプラットフォームを整備、マーカーや解説コンテンツといった拡張現実ガイダンスサービスシステムの実現に必要な要素を規格化し、誰もが拡張現実ガイダンスサービスシステムを安価に構築し維持管理できる環境を整えるための取り組みを行ってきたい。

また、今後は拡張現実ガイダンスサービスシステム実用化のゴールとして、拡張現実ガイダンスサービスシステム自体が「ないと困る」インフラストラクチャ的なサービスとなることを目指したい。拡張現実ガイダンスサービスシステムは見栄えが良いため、いわゆる「賑やか」「話題作り」として利用されることが多いが、これはただの流行でしかなく、サービス自体もエンタテインメント性の高い「あれば便利で面白い」レベルで終わってしまう。本研究で提案し「古代七つの文明展」で実際に運用した各種の拡張現実ガイダンスサービスシステムは「あれば便利で面白い」エンタテインメント性の高いサービスを実用化したものであったが、残念ながら「ないと困る」インフラストラクチャ的なサービスではなかった。今後は、国立民族学博物館で約40年も運用され続けているビデオテークシステムのように継続して利用されるサービスとなることを目指し、現状の「あると便利で面白い」から、「ないと困る」インフラストラクチャ的なレベルの拡張現実ガイダンスサービスシステムの実用化をゴールとしていきたい。

光量の変化に頑健な拡張現実ガイダンスサービスシステムの実現

本研究で提案したLEDをマーカーとして利用する拡張現実ガイダンスサービスシステムは美観をなるべく損なわず、情報提示ポイントであることが直感的に理解でき、展示物の特徴に左右

されず、光量が十分確保できない環境下でも利用可能であることを示した。しかしながら、例えば直射日光にさらされる動物園・植物園・水族館といった屋外展示施設では、LEDの輝度が相対的に低くなるために認識率が低くなってしまう。そこで、今後は光量に左右されない頑健な拡張現実ガイダンスサービスシステムの実現に向け、研究を進めていきたい。例えば、最近ではナイトツアーと銘打った、普段見られない展示施設の夜間の様子を見られるツアーが人気であるが、光量に左右されない頑健な拡張現実ガイダンスサービスシステムと組み合わせることで、昼夜を問わず運用できるようになり、また、昼夜で異なる解説コンテンツを用意することで、リピーターの増加に繋げるといったことが可能となる。

視覚以外の拡張現実ガイダンスサービスシステムの実現

近年では展示物に情報をプロジェクタで直接投影するプロジェクションマッピング、手に持つ必要のないメガネ型ディスプレイや指向性スピーカーでエリアを限定して情報を提供する新しいタイプの拡張現実ガイダンスサービスシステムも取り入れられるようになり、ますます多様になっている。例えばシンガポールの植物園、ガーデンズ・バイ・ザ・ベイ [54]では植物園のジオラマにプロジェクションマッピングによる解説を実施している(図 6-1)。しかしながら、これらの展示物はガラスケースや柵で仕切られた上、「展示物に手をふれないでください」との注意書きからも分かるように、5感の中でも特に視覚に特化している。このため拡張現実ガイダンスサービスシステムも視覚に訴える解説コンテンツがほとんどである。しかし、展示物を鑑賞するという行為は、ただ展示物に視線を向けるというだけではなく、見る、知る、感じる、考えるというプロセスを通して視点を豊かにし、想像力と感受性をもってその意味を読み解く行為である。今後は視覚以外の感覚を拡張する拡張現実ガイダンスサービスシステムを実現していきたい。

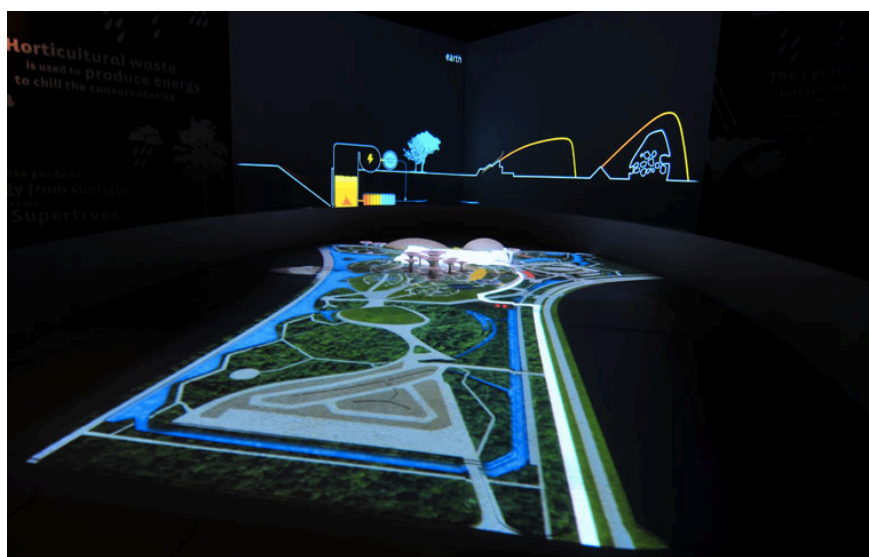


図 6-1 : ガーデンズ・バイ・ザ・ベイ プロジェクションマッピング解説 ([55]より引用)

謝辞

本研究は、著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程在学中かつ大日本印刷株式会社在職中に、慶應義塾大学理工学部斎藤英雄教授の指導のもとに実施したものです。本研究を行う機会を与えて下さった斎藤英雄教授に心から感謝をいたします。他分野出身であることの長所と短所を理解し、また社会人博士課程であるゆえの様々な事情を鑑みて頂き、自身の長所と業務に沿った研究を継続できたことは斎藤英雄教授の指導があつてのことでした。今後の人生における著者の生き方に大きく影響を与える貴重な経験をさせて頂きました。本当にありがとうございました。

本論文をまとめるにあたり、多くのご助言や有意義なディスカッションをしてくださいました慶應義塾大学理工学部岡田謙一教授、青木義満准教授、杉本麻樹准教授に深く感謝いたします。

考古学の観点からアドバイスを頂き、ご自身が主催する「古代七つの文明展」での実証実験を快諾して頂いた早稲田大学の吉村作治名誉教授、芸術学と展示陳列手法の視点からのご意見を頂いた女子美術大学の内山博子教授、展示会に設置する実証実験用のピラミッドジオラマを数度に渡り製作して頂いた同じく女子美術大学の首藤圭介助手、解説コンテンツ 3DCG を制作してくださいました埼玉工業大学の檀上 誠 准教授、「古代七つの文明展」のプロデューサーであり拡張現実ガイドンスアプリの実験と運用にご尽力頂いた RKB 毎日放送の山田尚氏に厚く感謝いたします。また、本研究を開始するきっかけを与えて下さいました大日本印刷株式会社の小松原繁氏、研究開発・展示会での実運用やユーザテストに協力していただいた同じく大日本印刷株式会社のもたい五郎氏、立川智哉氏、飯田拓氏、豊野千穂氏に感謝いたします。さらに、実証実験及びユーザテスト時に色々とお迷惑をお掛けした福岡市博物館、愛媛県立美術館、岡山市立オリエント博物館、宮崎県立美術館、花巻市博物館、青森県立美術館の皆様にも深く感謝いたします。皆様の心温かいサポートがあつたからこそ、本研究は成立しました。そして、同じ博士課程の先輩として様々なアドバイスを頂きました皆川卓也氏、林昌希氏、手島知昭氏に感謝いたします。

また、研究活動から遠ざかっていた著者に後期博士課程に進むきっかけを与えてくださいました金出武雄教授に特別の感謝を示します。「素人発想・玄人実装」という金出武雄教授の成功体験のパラダイムからいかに自由になるかという言葉は、人生を歩んでいく上で著者への自戒として深く心に刻まれました。

最後に長きに渡り著者を信じて見守り続けてくれた家族と両親に深く感謝します。彼らの理解があつたからこそ、本研究を成立させることが出来ました。

参考文献

- [1] "社会教育調査," 文部科学省, 2011.
- [2] 高橋 雄造, *博物館の歴史*: 法政大学出版社, 2008.
- [3] 吉田 憲司, *博物館概論*: 一般財団法人 放送大学教育振興会, 2011.
- [4] ART MOBILE APP. <http://www.joshjeffery.com/art-mobile-app>
- [5] 国立民族学博物館 ビデオテークシステム.
<http://www.minpaku.ac.jp/museum/exhibition/videothèque>
- [6] Victor 音声ガイダンスシステム XA-GP3R.
<http://www3.jvckenwood.com/pro/guidance/xa-gp3/index.html>
- [7] The Warhol: Art.
<https://itunes.apple.com/WebObjects/MZStore.woa/wa/viewSoftware?id=469316631&mt=8>
- [8] ルーヴル-DNP ミュージアムラボ. <http://www.museumlab.jp/>
- [9] PlaceEngine. <http://www.placeengine.com/>
- [10] SekaiCamera. <http://sekaicamera.com/>
- [11] 時雨殿. <http://www.shigureden.or.jp/>
- [12] Nintendo Online Magazine 2007 年 4 月号. <http://www.nintendo.co.jp/nom/0704/>
- [13] Miyashita Tsutomu et al., "An Augmented Reality museum guide," in *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*: IEEE and ACM, 2008, pp. 103-106.
- [14] 古代七つの文明展. <http://rkb.jp/7bunmei/>
- [15] 経済産業省, *JIS 照明基準総則 Z9110*: 一般財団法人 日本規格協会.
- [16] ARTToolKit. <http://artoolkit.org/>
- [17] Qualcomm Vuforia. <https://www.qualcomm.com/products/vuforia>
- [18] Nota Yuki and Kono Yasuyuki, "A real-world object recognition system employing 'invisible' visual markers," in *Transactions of the Information Processing Society of Japan.*, 2009.
- [19] Michael Zöllner, Jens Keil, Harald Wuest, and Daniël Pletinckx, "An augmented reality presentation system for remote cultural heritage sites," in *An Augmented Reality*

- Presentation System for Remote Cultural Heritage Sites.*, 2009, pp. 112-116.
- [20] Vincent Lepetit, Pascal Laguerre, and Pascal Fua, "Randomized trees for real-time keypoint recognitionI," in *International Journal of Computer Vision.*, 2005, vol. 2, pp. 775-781.
- [21] Carlo Tomasi and Takeo Kanade, "Detection and tracking of point features," in *International Journal of Computer Vision.*, 1991.
- [22] 荒木飛呂彦原画展 ジョジョ展. <http://www.araki-jojo.com/gengaten/>
- [23] unity3d. <http://unity3d.com/>
- [24] 植松 裕子, 斎藤 英雄, "複合現実感のための2次元矩形マーカを用いたカメラ追跡の精度向上," in *画像の認識・理解シンポジウム.*, 2007, pp. 1272-1276.
- [25] Akamai Reveals 2 Seconds as the New Threshold of Acceptability for eCommerce Web Page Response Times.
http://www.akamai.com/html/about/press/releases/2009/press_091409.html
- [26] Sandor Christian, Cunningham Andrew, Dey Arindam, and Mattila Ville-Veikko, "An Augmented Reality X-Ray System Based on Visual Saliency," in *Proceedings of the 9th International Symposium on Mixed and Augmented Reality: IEEE*, 2010, pp. 27-36.
- [27] 川上 直樹, 稲見 昌彦, 柳田 康幸, 前田 太郎, 舘 暲, "現実感融合の研究(第2報) -Reality Fusionにおける光学迷彩技術の提案と実装-", in *日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集: 日本バーチャルリアリティ学会*, 1998, vol. 3, pp. 285-286.
- [28] ハウステンボス. <http://www.huistenbosch.co.jp/event/3dmapping/>
- [29] The Haunted Mansion | Magic Kingdom Attractions.
<https://disneyworld.disney.go.com/attractions/magic-kingdom/haunted-mansion/>
- [30] Bimber Oliver and Raskar Ramesh, *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds.* A K Peters/CRC Press, 2005.
- [31] Illumiroom. <http://research.microsoft.com/en-us/projects/illumiroom/>
- [32] TAKENAKA CO LTD. https://www.youtube.com/watch?v=q7y_6kcEt18
- [33] 河合 隆史, 田中 見和, *次世代メディアクリエイター入門1 立体映像表現: カットシステム*, 2003.
- [34] 本田 捷夫他, *立体視テクノロジー—次世代立体表示技術の最前線:* (株)エヌ・ティー・エス, 2008.
- [35] NVIDIA 3D VISION. <http://www.nvidia.com/object/3d-vision-main.html>
- [36] 大日本印刷株式会社. <http://www.dnp.co.jp/cio/solution/index.html>

- [37] Julian Beever. <http://www.julianbeever.net/>
- [38] Shree K Nayar and Srinivasa G Narasimhan, "Vision in Bad Weather," in *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*.: IEEE, 1999, vol. 2, pp. 820-827.
- [39] Kshitiz Garg and Shree K Nayar, "Photometric Model for Rain Droplets," in *Columbia University Technical Report*., 2003.
- [40] Kshitiz Garg and Shree K Nayar, "Detection and Removal of Rain from Videos," in *Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.: IEEE, 2004, vol. 1, pp. 528-535.
- [41] Paul A Boynton and Edward F Kelley, "Liquid-filled camera for the measurement of high-contrast images," in *The Proceedings of SPIE, Cockpit Displays X*., 2003, vol. 5080, pp. 370-378.
- [42] Keith Faulkner, Colin J Kotre, and Louka M, "Veiling Glare Deconvolution of Images Produced by X-ray Image Intensifiers," in *The Proceedings of Image Processing and its Applications*.: IEEE, 1989, pp. 669-673.
- [43] Jean Luc Starck, Eric Pantin, and Fionn Murtagh, "Deconvolution in Astronomy: A review," in *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*., 2002, vol. 114, pp. 1051-1069.
- [44] Erik Reinhard, Greg Ward, Sumanta Pattanaik, and Paul Debevec, *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*.: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2006.
- [45] Shree K Nayar, Vlad Branzoi, and Terry E Boulton, "Programmable Imaging: Towards a Flexible Camera," in *International Journal of Computer Vision*.: ACM, 2006, vol. 70(1), pp. 7-22.
- [46] Shree K Nayar, Vlad Branzoi, and Terry E Boulton, "Programmable Imaging using a Digital Micromirror Array," in *Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition*.: IEEE, 2004, vol. 1, pp. 436-443.
- [47] Assaf Zomet and Shree K Nayar, "Lensless Imaging with a Controllable Aperture," in *The Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*.: IEEE, 2006, vol. 1, pp. 339-346.
- [48] K Shree Nayar and Branzoi Vlad, "Adaptive dynamic range imaging: optical control of pixel exposures over space and time," in *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*.: IEEE, 2003, vol. 2, pp. 1168-1175.

- [49] Ashok Veeraraghavan, Ramesh Raskar, Amit Agrawal, Ankit Mohan, and Jack Tumblin, "Dappled Photography: Mask Enhanced Cameras for Heterodyned Light Fields and Coded Aperture Re-focusing," in *ACM Transactions on Graphics*: ACM, 2007, vol. 26(3), p. 69.
- [50] Eino-ville Talvala, Andrew Adams, Mark Horowitz, and Marc Levoy, "Veiling glare in high dynamic range imaging," in *ACM Transactions on Graphics*: ACM, 2007, vol. 26(3).
- [51] Ramesh Raskar, Amit Agrawal, Cyrus Wilson, and Ashok Veeraraghavan, "Glare Aware Photography: 4D Ray Sampling for Reducing Glare Effects of Camera Lenses," in *ACM Transactions on Graphics*: AVM, 2008, vol. 27(3), p. 54.
- [52] Fukuchi Isao, Yamashita Atsushi, Kaneko Toru, and T Miura Kenjiro, "Removing Adherent Noise from Image Sequences in Rainy Weather by Spatio-Temporal Image Processing," in *The Journal of The Institute of Image Information and Television Engineers*: ITE, 2008, vol. 62(5), pp. 771-777.
- [53] Nobuyuki Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," in *Transactions on Systems, Man and Cybernetics*: IEEE, 1979, pp. 62-66.
- [54] Gardens by the Bay. <http://www.gardensbythebay.com.sg/en/home.html>
- [55] multimedia people. <http://mmpeople.com.sg/2012/gardens-by-the-bay/>

付録 A

本研究における展示活動について

A.1 展示活動について

本研究における展示活動、実証実験とユーザテストは2011年6月より日本各地で開催されている「古代七つの文明展～人と地球と太陽の船～」にて実施した。本展示会は考古学者 吉村作治教授監修による世界の古代七大文明（エジプト、古代オリエント、ギリシャ・ローマ、シルクロード・インド、中国、中南米、日本）に関する展示会である。この展示会にはエジプトギザの大ピラミッドの付近から発掘された「太陽の船」に関する特設コーナーがあり、ここに「太陽の船」を解説するための展示物を制作、この展示物に対する拡張現実ガイダンスサービスシステムを構築した。

A.2 太陽の船について

「太陽の船」は1954年および1987年にギザの大ピラミッドの付近で発見された2隻の木造の船であり、紀元前2500年頃、古代エジプト・古王国時代第4王朝のファラオであったクフのために造られたとされ、「クフ王の船」とも呼ばれる。1954年に発掘された「第一の太陽の船」はアフマド・ユセフ氏により復原が行われ、現在は太陽の船博物館に展示されている。「第二の太陽の船」は第一の船が発見された船坑の西隣から吉村作治教授らにより1987年に発見され、現在発掘作業が行われている。2011年から船坑を覆っている41個の蓋石取り上げ作業を開始し、2012年に木材サンプルを取り上げ、材質や樹種の検査と保存・強化処理薬のテスト、重量、形状、材質、劣化度などの計測・調査が行われ、さらに三次元撮影及び測量が実施されている。

A.3 太陽の船 解説展示について

「古代七つの文明展～人と地球と太陽の船～」展示会の「太陽の船」特設コーナーに女子美術大学 内山博子教授、首藤圭介助手らが制作した、1/100スケールのギザの大ピラミッドの精密なジオラマを設置した。ギザの大ピラミッドのサイズは高さ138.74 m、底辺：230.37 mであるため、1/100スケールのピラミッドのジオラマサイズは高さ138.74 cm、底辺230.37 cm、ピラミッド周辺の遺跡も再現した台座を含めると高さ約200 cm、横幅と奥行きが約300 cmと巨大なものとなっており、また、積み上げられた石段210段も正確に再現されている。制作したギザの大ピラミッドジオラマを図A-1に示す。この大ピラミッドジオラマに対して太陽の船を解説する拡張現実ガイダンスサービスシステムを構築し、閲覧者に対する実証実験とユーザテストを実施した。



図 A-1 : ギザの大ピラミッド ジオラマ

A.4 「古代七つの文明展」会場と拡張現実ガイダンスサービスシステム実施内容

「古代七つの文明展」の展示会場、実施時期、拡張現実ガイダンスサービスシステム実施内容と解説コンテンツについて示す。本展示会は、2011年6月から、福岡の福岡市博物館を皮切りに全国を巡回展示するものであり、日本にあるコレクションから古代七大文明（エジプト、古代オリエント、ギリシャ・ローマ、シルクロード・インド、中国、中南米、日本）の出土品約250点が展示されている。それぞれの会場で段階を踏みながら展示施設のための拡張現実ガイダンスサービスシステムの実用化実証実験を実施した。拡張現実ガイダンスサービスシステムの解説コンテンツは太陽の船の発掘の進捗やユーザテストの結果に合わせ、随時アップデートを実施している。

表 A-1：太陽の船の展示会場、実施時期、実施内容と解説コンテンツ

時期	場所	実施内容	コンテンツ
2011年 6～9月	福岡市博物館	1) LED-ARガイダンスシステム	太陽の船解説 発掘の様子解説
2011年 9月～11月	愛媛県立美術館	1) LED-ARガイダンスシステム (コンテンツアップデート)	太陽の船解説 発掘の様子解説
2012年 4月～6月	岡山市立 オリエント博物館	1) LED-ARガイダンスシステム 3) LED-ARガイダンスシステムHMD拡張/比較調査	太陽の船解説 発掘の様子解説
2012年 7月～9月	宮崎県立美術館	1) LED-ARガイダンスシステム (コンテンツアップデート)	太陽の船解説 発掘の様子解説
2012年 9月～11月	花巻市博物館 (岩手)	1) LED-ARガイダンスシステム 4) ARガイダンスシステムによる展示物内部構造の表示	ピラミッド内部構造解説
2013年 9月～11月	青森県立美術館	1) LED-ARガイダンスシステム 5) 立体プロジェクションマッピングARガイドシステム による展示物内部構造の表示	ピラミッド内部構造解説

付録 B

拡張現実ガイダンスサービスシステム の運用

ここでは一連の展示活動及びユーザテストで発生した、使用機材に起因する様々な不具合とその対応経験から、展示施設のための拡張現実ガイダンスサービスシステムの運用について論じる。

B.1 使用機材の不具合

まず、iPad2 に起因する不具合を表 B-1 にまとめた。これは展示会の開催日数が累計で約 6 ヶ月となった時点での集計である。1 日の稼働時間は約 10 時間、1 ヶ月の開館日を約 25 日とすると $6 \times 25 \text{ 日} \times 10 \text{ 時間} = 1,500 \text{ 時間}$ 時点でのデータである。展示会では常時 8 台の iPad2 を配置していた。

表 B-1 : iPad2 不具合一覧

トラブル内容	発生時期	対応
充電ケーブル破損(断線) 4本 充電アダプタ焼損 1台	3ヶ月目から発生	新品交換
充電不良 3台	5ヶ月目から発生	新品交換
ジャイロセンサ故障 1台	2ヶ月目に発生	新品交換
スタンド破損 4台	3ヶ月目から発生	新品交換
本体の変形 1台	1ヶ月目に発生	変形以外の問題無し 予備機として継続使用

運用を続けていく上で大きな問題となったのが充電に関するトラブルである。まず、充電ケーブルの iPad2 側の付け根が断線し、電源が供給できなくなり電池切れを起こしてしまった。また、充電アダプタの焼損も発生した。これらは新品交換で対応した。次にバッテリーの劣化による充電不良も発生し、本体の新品交換となった。また、1 台はジャイロセンサが故障し、これも本体の新品交換となった。本体が変形したのも 1 台あったが、これは背面に強力接着剤で貼り付けた盗難防止ワイヤが強引に引っ張られて変形したものであった。使用に問題はなかったため、予備機と入れ替えた。尚、LED やその他の機材に関する不具合は発生しなかった。



図 B-1 : 使用機材のトラブル

B.2 利用者に起因する不具合

次に利用者に起因する不具合、いわゆるイタズラの内容を表 B-2 にまとめた。こちらも 1,500 時間時点でのデータである。

表 B-2 : 利用者に起因する不具合

トラブル内容	影響	対応
アプリを終了して放置	次の人が操作できない	手動でアプリ再起動
キャプチャしたアプリ画像をデスクトップに設定	アプリがフリーズしているように見える	手動でデスクトップ復帰、アプリ再起動
パスワードを設定され、復帰できなくなる	操作できなくなる	初期化、アプリ再インストール

想定よりイタズラは少なかった。これは展示会の性質上、閲覧者として高齢者の比率が高かったのも一因だと考えられる。

B.3 変化する照明環境への対応

展示施設で展示会を実施する際、会場設営時と本番時の照明環境が異なることが一般的である。図 B-2 に示すように、設営時は細かい作業が出来るよう一般のオフィス環境と同じ白色蛍光灯で 600 lx 程度の照明環境となっているが、作業の進捗に伴って展示物に合わせた照明に切り替わり、さらに展示物ごとにスポット照明の設置作業等が実施され、最後に展示責任者による照明の調整(光量を落とし、スポット照明で展示物が浮かび上がるように設定)が実施される。照明調整が終了するタイミングは、大抵、展示開始直前(オープン前日夕方)となるため、画像認識関係の調整を行う時間が十分取れない。さらに、会場によっては図 B-3 のように太陽光の影響を受け、時間によって照明環境が変化することもある。

一方、拡張現実ガイダンスシステムをスマートフォンアプリとして一般に配布する場合、その審査に 1~2 週間ほど必要となるため、現場の照明環境に対応することが出来ないこともある。このため、拡張現実ガイダンスシステムの実用化には本稿 2.3.2 節で提案しているような自動調節機能が必須となる。

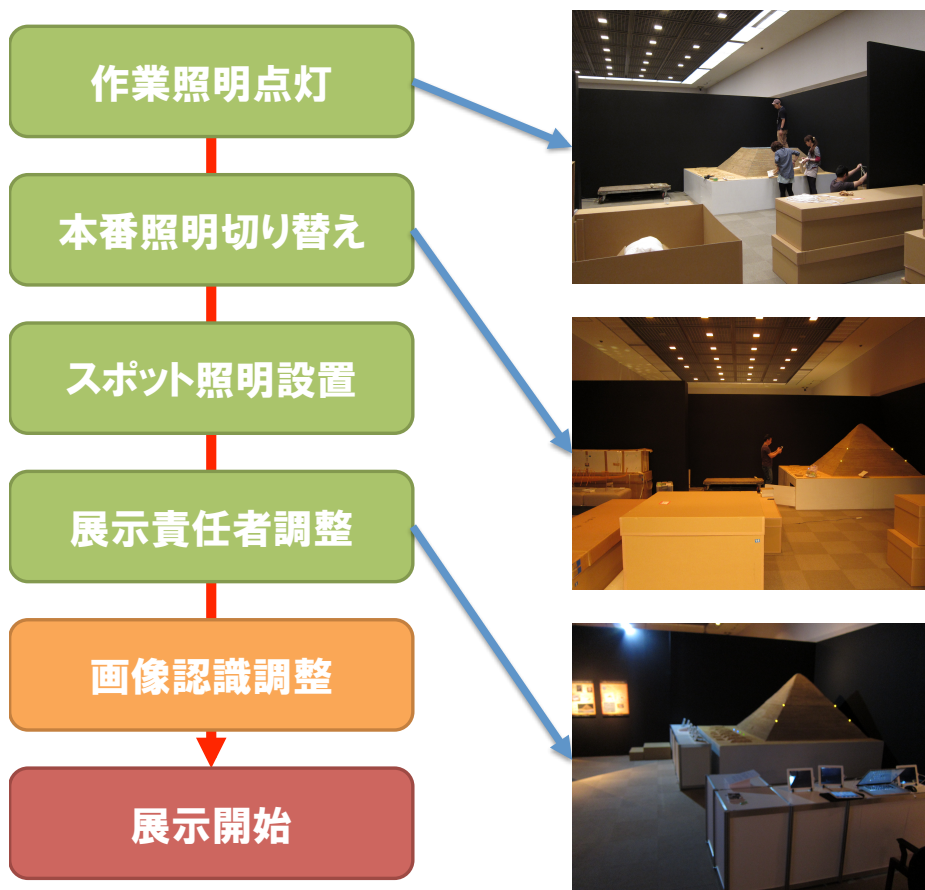


図 B-2 : 照明切り替えフロー



図 B-3 : 太陽光が差し込む環境の例, 夕方になると西日の影響を受けた

B.4 いたずら・盗難防止, 安全性確保

展示会での携帯端末の運用において, 利用者のイタズラを防ぐ必要がある。一番良い方法としては, 利用者が展示アプリ以外にアクセスできないようにすることである。具体的には, 図 B-4 のようにホームボタン・電源ボタン・ロックボタン等に触れないよう端末全体を覆う透明なクレードル等を制作し, 物理的に塞いでしまうのが一番である。但し, 端末の管理者も触れなくなってしまうため, 例えばホームボタンを細い棒で押せるような仕掛けが必要である。また, 携帯端末の盗難防止も必要であるが, 最近の端末はデザイン優先のため, 盗難防止ワイヤを結びつける場所がない。そこで図 B-5 に示すように強力な接着剤で盗難防止ワイヤを携帯端末の背面に直接接着し, ワイヤを展示テーブルに鍵で固定した。これが功を奏し, 盗難被害はなかったが, 1 台だけ本体が変形するほど強く引っ張られた端末があった。携帯端末自体の不良交換はコスト的にも頭が痛い問題である。本展示会では故障により半年で常設 8 台中 4 台が交換となってしまった。これに関しては有効な対策はなく, 予備機を十分用意しておく以外にない。

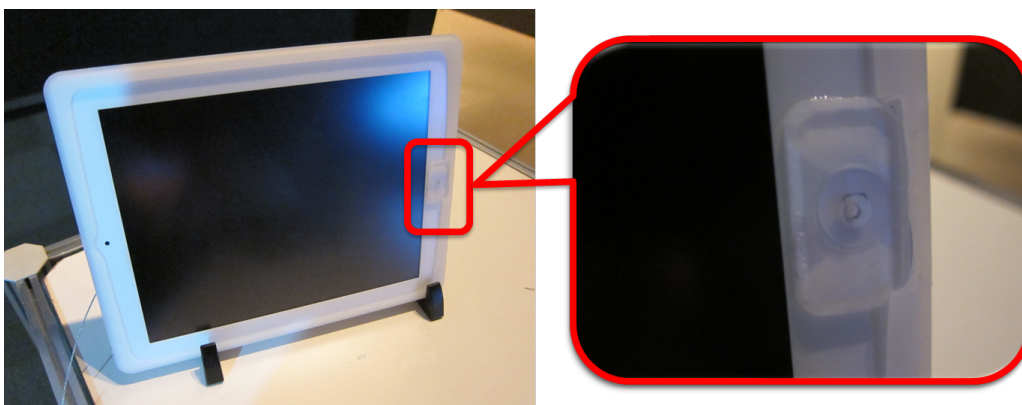


図 B-4 : イタズラ防止

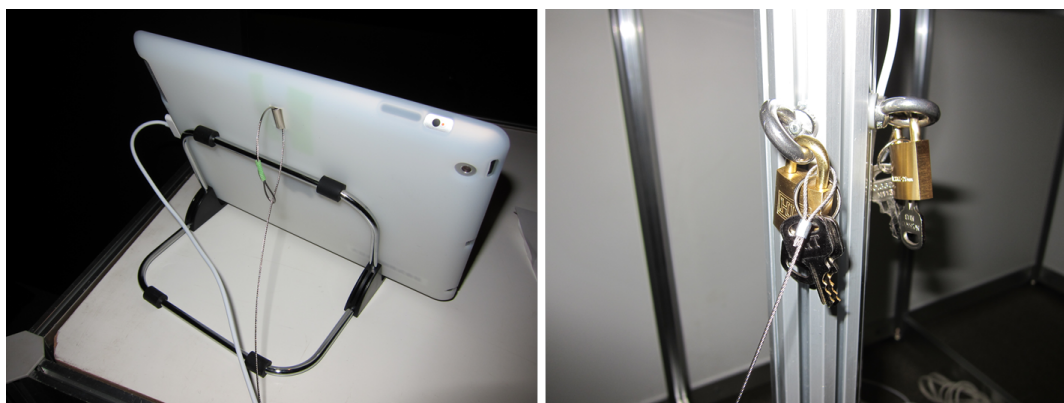


図 B-5 : 盗難防止ワイヤーロック

B.5 拡張現実ガイダンスサービスシステム運用について

日々の運用において、無人で運用できるようにすることも重要である。例えば開場 1 時間前に自動起動し、閉場後に自動終了できれば、運用スタッフのリソースを消費しなくて済むため、導入もスムーズにいきやすい。逆にオペレーションが全て手動だと、運用スタッフからは歓迎されず、導入がスムーズに行かないこともある。今回の事例では、残念ながら起動・終了を自動化できず、運用スタッフが朝晩 8 台の iPad2 の電源オンオフを数分かけて行うこととなってしまった。LED の点灯だけはタイマーにより自動オンオフを実施した。

ソフトウェアのバグに備えて展示会場と同等の環境を開発現場に用意することも重要である。今回は開発と検証に十分時間をかけてから展示に望んだため、幸いにもバグは発生しなかったが、もし発生した場合、お客様が来場している展示会場でデバッグ作業をすることは非常に困難である。