

修士論文

光学シースルー HMD のための仮想物体の 半透明感を低減する提示手法

渡邊 大生

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

情報理工学プログラム

主指導教員: 加藤 博一 教授

インタラクティブメディア設計学研究室（情報科学領域）

令和 2 年 3 月 13 日提出

本論文は奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

渡邊 大生

審査委員：

加藤 博一 教授	（主指導教員，情報科学領域）
清川 清 教授	（副指導教員，情報科学領域）
神原 誠之 准教授	（副指導教員，情報科学領域）
藤本 雄一郎 助教	（副指導教員，情報科学領域）

光学シースルー HMD のための仮想物体の 半透明感を低減する提示手法*

渡邊 大生

内容梗概

光学シースルー HMD（以下 OST-HMD と呼ぶ）はビデオシースルー HMD（以下 VST-HMD と呼ぶ）とくらべ、その構造が単純軽量であることや周囲の光を HMD で再現する必要がなく、仮想物体を除いた領域の応答遅延がないため、周囲の環境が激しく変化する作業現場などへの応用に適していることが利点である。その一方で OST-HMD は仮想物体を提示する際に、ユーザ周囲由来の光と HMD 由来の光が混合してしまうため、周囲の光の分布によっては仮想物体が認識しづらくなるという問題がある。この解決法として、仮想物体の映像から、その背景の映像を差し引いた差分映像を出力することが考えられる。しかし、周囲の光が目標とする仮想物体より明るい場合、負の強度をもつ光を出力することが求められるため現在通常の OST-HMD では提示ができない。そこでこれまで Occlusion Capable Head Mounted Display として仮想物体領域の背景光を遮断するための新たなハードウェアを追加した OST-HMD が多く提案されてきた。ただし、このような OST-HMD が実用化されるまでには光学系の複雑さから、比較的長い時間がかかると考えられる。そこで本研究では従来型の OST-HMD を用いてソフトウェアの改良のみによって、仮想物体のオフセット成分を除いて周囲由来の光を低減させる方法を提案・実装し、その評価を行った。

キーワード

光学シースルー HMD, 拡張現実感, 色補正, 半透明感低減

*奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 修士論文, 令和 2 年 3 月 13 日.

Visual Presentation Method to Reduce Semi-Transparency of Virtual Object for OST-HMD*

Taisei Watanabe

Abstract

Optical See-Through Head Mounted Display (OST-HMD) has advantages which are that the construction is simple, lightweight and no necessary to re-product the environment light by the OST-HMD itself. Therefore, OST-HMD is more suitable for working sites which are dynamically changing compare to Video See-Through Head Mounted Display. Meanwhile, there is a problem that the emitted light from HMD mixture with the environment light when an OST-HMD presents a virtual object. As the result, it makes the user can not recognize the virtual object on the problem. One possible solution is that the OST-HMD displays the difference of the virtual object image from the background image. However, when the background light amount is much more than the virtual object, it needs displaying minus light amount. Hence, ordinal OST-HMD can not display such a difference sometimes. To avoid this kind of problem, number of researcher proposed many types of Occlusion Capable Head Mounted Displays to block environment light. However, it has complex optics that's why I think Occlusion Capable HMD still needs long time to appear in actual uses. Now, I proposed the purely software-based method to counteracting the environment light component except for the offset. Then, I implemented and evaluate the method.

Keywords:

*Master's Thesis, Graduate School of Science and Technology Science, Nara Institute of Science and Technology, March 13, 2020.

Optical See-Through Head Mounted Display, Augmented Reality, Color Compensation, Reducing Semi-Transparency

目次

図目次		vi
第 1 章	はじめに	1
第 2 章	OST-HMD を用いた色混合問題に関連する研究と本研究の位置づけ	3
2.1	ハードウェアによるオクルージョンの実現	3
2.2	ソフトウェアによる色混合問題への取り組み	5
2.3	本研究の位置づけ	7
第 3 章	OST-HMD 入力画像 - Scene-Camera 出力画像間の色変換モデル	8
3.1	OST-HMD 入力画像 - Eye-Camera 出力画像間の色変換モデル . .	8
3.2	Scene-Camera 出力画像 - Eye-Camera 出力画像間の色変換モデル	10
第 4 章	色変換モデルを用いた仮想物体提示手法	13
4.1	従来の提示手法	13
4.1.1	仮想物体をそのまま提示する手法: naive	13
4.1.2	差分を出力する手法: simple difference	14
4.1.3	差分を引き上げて提示する手法: pull up	15
4.2	提案する提示手法	17
第 5 章	OST-HMD 入力画像 - Scene-Camera 出力画像間の幾何学的キャ リブレーションと光学的キャリブレーション	19
5.1	幾何学的キャリブレーション	19
5.1.1	概要	19
5.1.2	本研究への応用	21
5.2	光学的キャリブレーション	22
5.2.1	画像ペアデータ収集	24
5.2.2	パラメータ最適化	26
第 6 章	実験	27

6.1	実験環境	27
6.2	半透明感低減手法の動作確認実験	28
6.2.1	動作確認方法	29
6.2.2	動作結果	30
6.3	半透明感低減手法の評価	36
6.3.1	改善手法のパラメータによる仮想物体の視認性調査実験 . .	36
6.3.2	調査の結果と考察	37
第 7 章	まとめ	41
	謝辞	42
	参考文献	43
	発表リスト	47

図目次

2.1	関連研究と本研究の位置づけ	4
3.1	各記号の関係図	9
5.1	本研究のキャリブレーションにおけるハードウェアの幾何学的光学的関係図	20
5.2	グレイコードキャリブレーションの例 (y 軸)	21
5.3	OST-HMD - Eye-Camera 間の幾何学的キャリブレーションにおける画像上の座標の対応	22
5.4	Scene-Camera - Eye-Camera 間の幾何学的キャリブレーションにおける画像上の座標の対応	23
5.5	OST-HMD - Eye-Camera 間の光学的キャリブレーションのためのデータ収集	25
5.6	Scene-Camera - Eye-Camera 間の光学的キャリブレーションのためのデータ収集	25
6.1	ハードウェアの構成	28
6.2	暗室内の様子	28
6.3	入力画像 ($\vec{i}_V > \vec{i}_B$: 左側, $\vec{i}_V < \vec{i}_B$: 右側)	30
6.4	各提示手法の実行結果 ($\vec{i}_V > \vec{i}_B$: 左側, $\vec{i}_V < \vec{i}_B$: 右側)	31
6.5	$\vec{i}_E$ をスライスした図, $\vec{i}_V > \vec{i}_B$	32
6.6	$\vec{i}_E$ をスライスした図, $\vec{i}_V < \vec{i}_B$	33
6.7	目標値が OST-HMD の出力限界未満で済む例	35
6.8	目標値が OST-HMD の出力限界を超える例	35
6.9	ユーザスタディに用いる画像と q の組み合わせ	37
6.10	アンケートの一例	37
6.11	q に対する主観類似度	38
6.12	絶対平均誤差の対数に対する主観類似度	38

6.13	q に対する誤差と主観類似度	38
6.14	画像特徴量と主観類似度との関係 (平均)	38
6.15	画像特徴量と主観類似度との関係 (分散)	38
6.16	画像特徴量と主観類似度との関係 (周波数)	38

第 1 章 はじめに

近年の Human Computer Interaction (HCI) 技術の進歩はめざましく、人間の視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚を仮想的に拡張または置き換える取り組み、または拡張する取り組みが多く行われている。このうち聴覚を仮想的に置き換える装着型デバイスとして、ヘッドホンやイヤホンが存在するが、すでに技術は成熟期に達しており、人間の可聴域を超えた周波数成分をもつ音を再現することも可能となっている。またユーザの周囲の環境音を打ち消すノイズキャンセリング機能を持ちながら、一時的に周囲の音を聞きたい場合には、ユーザが手をヘッドホンにかざすことで自由に環境音を取り込むことができる製品も販売されている。一方で視覚や触覚、味覚、嗅覚はそれとくらべて技術的に発達段階にあると考えられる。特に視覚に関しては Head Mounted Displays (HMD) と呼ばれる頭部に装着するディスプレイとして精力的に研究開発が行われており、初期は Sutherland のプロトタイプ [1] から始まり、近年では PlayStationVR (Sony Interactive Entertainment)[3], Moverio (EPSON)[4], HoloLens (Microsoft)[5] などのような製品群が販売されている。このうち、Sutherland のプロトタイプ、Moveiro, HoloLens は Optical See-Through Head Mounted Display (OST-HMD) と呼ばれ、半透明ディスプレイを用いて現実風景に仮想物体の映像を重畳するように提示する HMD である。一方で PlayStationVR のような HMD は Video See-Through Head Mounted Display (VST-HMD) と呼ばれ、こちらはユーザに提示する映像は何らかのディスプレイから提示される映像のみである。また表 1.1 は代表的な See-Through HMD (別途カメラの設置が必要なものを含む) を示したものである。ここで同時期に発売された VST-HMD と OST-HMD である PlayStationVR と HoloLens を比較すると、PlayStationVR の解像度は両目で 1920×1280 であり、視野角は 100 度、フレームレートは 120[fps] である。一方 HoloLens の解像度は 1280×720 であり、視野角は PlayStationVR よりも小さくフレームレートは 60[fps] である。これを一見すると、VST-HMD である PlayStationVR の方が OST-HMD である HoloLens より優れているかのように感じるが、OST-HMD では特に広視野角化、高い幾何学的整合性、時間的整合性、光学的整合性の実現が難しい [17] といわれているため、同じ指標であっても VST-HMD と OST-HMD とで同列には扱うことはできない。

一方，視覚情報を重畳提示する技術のひとつとして Augmented Reality (AR) と呼ばれる技術が存在する．これは幾何学的整合性，光学的整合性，時間的整合性を保ちつつ仮想物体を現実風景に重畳表示する技術であり，現在では HMD やスマートフォンを用いて実現される．また HMD を用いて AR を実現する場合，従来では VST-HMD を用いた実現が主流であったが，近年では OST-HMD を用いた実現が主流となりつつある．しかし，OST-HMD を用いた AR 実現には仮想物体が現実風景に透けて重なるという問題や現実世界と仮想物体との間で解像度と遅延が大きく異なる問題などがある [16, 17]．また OST-HMD は産業における作業支援への応用が期待されているが，特に仮想物体が背景と混合し透けて見える場合にその作業効率に影響を与える可能性があると考えられる．そこで本研究では仮想物体領域の輝度の大小関係を保存しつつ最小限の光量で背景の影響を取り除く方法を提案・実装し，その評価を行う．

表 1.1: 代表的な HMD の特性表

HMD		タイプ	解像度 (横 × 縦)	視野角	fps
	HoloLens[5]	OST	1280 × 720	35°	60
	Moverio BT-30C[4]	OST	1280 × 720	23°	60
	PlayStationVR[3]	VST	960 × 1080	100°	120
	HTC VIVE Pro[6]	VST	1440 × 1600	110°	90

第 2 章 OST-HMD を用いた色混合問題に関連する研究と本研究の位置づけ

本研究では仮想物体の色成分に背景の色成分が混合してしまい仮想物体が認識しづらくなってしまう問題を色混合問題として、これに着目し解決することを目指とする。しかし過去にもこのような OST-HMD を用いた色混合問題に関する類似の研究は行われており、大きく Occlusion Capable Optical See-Through Head Mounted Display (Occlusion Capable OST-HMD) として、奥行き情報に基づいて背景光の影響を空間的に自由に遮断可能な OST-HMD を目指したハードウェア改善が中心となる研究と、背景光や仮想物体に対して適応的に OST-HMD への指令値を制御するソフトウェアの改善が中心となる研究とがある。

2.1 ハードウェアによるオクルージョンの実現

ハードウェア改善に関する研究の一つには Kiyokawa らの [8, 9] がある。これは仮想物体が存在する箇所のみ現実光を遮蔽し、その領域に仮想物体を提示することにより、仮想物体が背景光と混合し半透明となることを避けることができる。しかしながら、このような液晶を用いて背景光を遮断する手法は、古くから研究室レベルでは開発されており、現在もなおその光学系の簡単化や視野角向上、軽量化、Occlusion Mask の先鋭化、計算コストのすべてを実用的なレベルで実現することを目指し研究が続けられている [12, 13, 7] が、未だに実用化には至っていない。その理由としては、その背景光を取り除く機構をもつ HMD の Proof of Concept に注力するため、人間の目の位置を完全に固定することや目の代わりに Eye-Camera を設置し目と HMD の幾何学的な関係が変化しないように設定された状態で行われており、目の位置が装着中も変化する実応用の場面では適用が難しいことが挙げられる。

このハードウェア改善に関する研究に関して詳しくみる。Uchida らはテキサス・インスツルメンツによって開発された微小な鏡を平面に多数配列した素子であり、それぞれの微小ミラーの角度を ON/OFF で 2 つの角度に制御可能な MEMS デバイスである Digital Mirror Device (DMD) を Spatial Light Modulator (SLM)

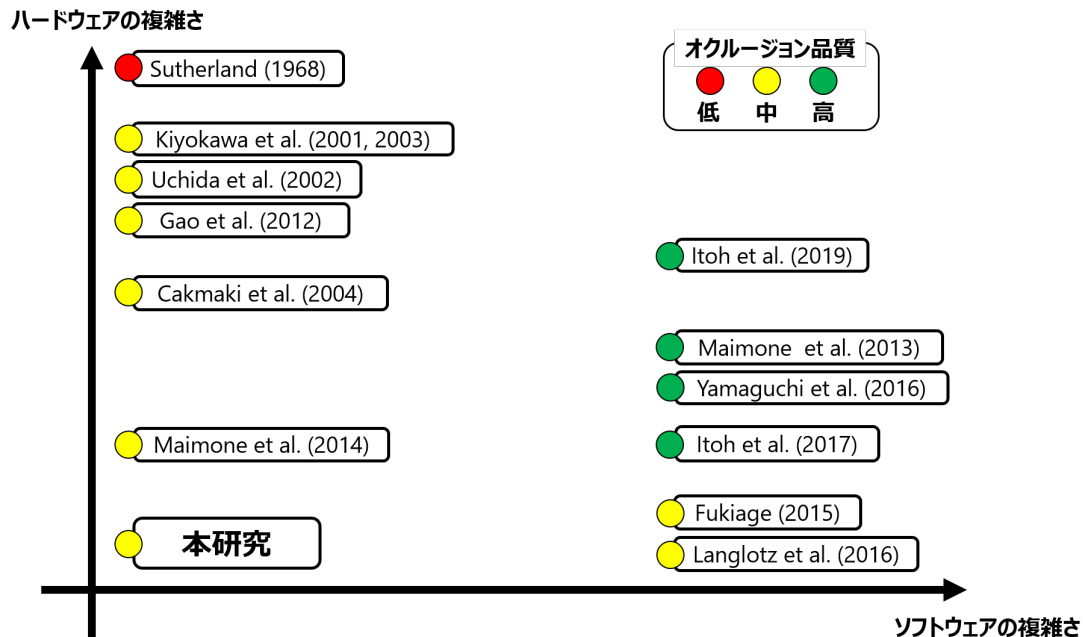


図 2.1: 関連研究と本研究の位置づけ

として使用することを提案した [10]. また Cakmakci らは 反射的な LCD である Liquid Crystal on Silicon (LCoS) を用いて Uchida らと類似のシステムを構築した. これにより LCoS パネルの反射特性を切り替えることで, 偏光されたシーン光を遮断することが可能となった. またオクルージョン機能を備えた彼らのシステムは, 片目部分の重量が 50 グラムであった [11]. また Gao らは Cakmakci の設計に加え, ディスプレイのサイズと光学パフォーマンスを改善するためのフリーフォームプリズムを導入した. これによって片目部分の重量が 20 グラムとなり, [11] とくらべ軽量化を果たした [12]. また山口らによるマイクロレンズアレイを用いた Occlusion-Capable な統合的ライトフィールドディスプレイがある. これはマイクロレンズアレイパネルの間に透過型 LCD を挿入することで, マイクロレンズを透過した光がオクルージョン機能を持つようにしたものである. このシステムは一つのマイクロレンズについては Kiyokawa らの ELMO シリーズに似ているが, マイクロレンズを用いることでシステム全体の小型化に成功している. また彼らは複数の視点でオクルージョンを実現する 3D オクルージョン機能を追加したが, 代わりに計算コストが大きくなり, かつある視点から仮想物体を見た際に他の視点を

基準に作成した複数のオクルージョンマスクが混ざって表示されてしまうため、マスクの解像度が落ちてしまうことが問題であった [13]。また Maimone らはピンライトプロジェクションに基づいたフォーカスフリーディスプレイを提案した。これによって単層 LCD によるオクルージョン機能を実現したが、代わりにオクルージョンリークと呼ばれる遮蔽領域が仮想物体の外に漏れ出し、仮想物体の周囲が黒くなる問題を引き起こした [14]。その後 Maimone らは 3 層に重ねた LCD を用いて、この光路を考慮したライトフィールドを計算して仮想物体を描画する、多層シースルーディスプレイを提案した。これは光学シャッターに同期して、提示する画像を時間的に切り替えることでオクルージョンを実現している。この研究は 3D オクルージョンも実現しており、ライトフィールドを逐次計算して提示する画像を生成するために、[13] のように他の視点を基準に作られた複数のマスクが混合して見えることはない。ただし 3D オクルージョン実現するためのライトフィールドの計算にコストがかかることが問題である [15]。また Itoh らは [14] で起こっていたオクルージョンリーク問題を解決するために、仮想物体の周囲のオクルージョンマスクが先鋭に見えるような補正を行う成分を仮想物体に足し合わせた画像を提示する手法を提案した [7]。

2.2 ソフトウェアによる色混合問題への取り組み

ここでは従来の OST-HMD の構造のままソフトウェアによって目標の色を再現する研究にフォーカスをあてる。Langlotz らの Radiometric Compensation for OST-HMD[19] では、Epson Moverio BT-100 とハーフミラーを用いて目に入る光を反射させた上で、カメラによってユーザ視点の背景を観測し、その情報を用いて HMD の出力光量を調整することにより背景要素の除去を試みている。またこの研究では、Grundhöfer らが提案した Projector Camera System においてプロジェクタが提示可能な範囲を超えた場合に人間の知覚に基づいて、そのアーティファクトをできる限り人間に知覚されないようなプロジェクタ映像補正手法 [22] を OST-HMD に転用し、OST-HMD の出力可能な光を超えた場合に知覚する映像を可能な限りターゲット画像に近づける手法を提案した。しかし、手法を適用したアイカメラで撮影した画像をユーザに提示し主観評価を行った結果、知覚特性を応用

した手法と応用しない手法とで有意差はみられなかった。またこの研究では提示画像を計算するために必要な threshold map は、人間の明るさ知覚特性を考慮した TVI map[23] と、人間の空間周波数とコントラスト知覚特性を考慮した elevation factor map[22] の積である [22] が、TVI map の計算に関しては [24] を参考にして

いる。

新たな視点として、光を減算する OST-HMD も提案されている。伊藤らは偏光に基づくカラーフィルタを用いて、背景光の影響を必要な量だけ減らすような制御を行う、Jones Calculus に基づく手法を提案した [20]。この手法と加算可能な従来の OST-HMD を組み合わせることで、HMD の提示可能な光量の範囲を拡張することが可能だと考えられるが、現段階では、ある波長の光を別の波長に変調することで彩度を制御しているのみであるため、特定の波長の光を所望の量だけ差し引くことはできない。また Polarized Beam Splitter (PSB) や Phase-only Spatial Light Modulator (PSLM) を必要とすることなど、従来の OST-HMD にこれらの新たなハードウェアの追加が求められるため装置は大型化、高価格化せざるを得ず、実用化まで比較的長い時間が必要であると考えられる。

また少し本研究のテーマからは離れるが、吹上らの透明視を用いたオクルージョン表現方法に関する研究がある [21]。この手法は独自の透明視を用いた視認性モデルを構築した上で、オクルージョンを正確に表現できない場合に視認性を仮想物体の奥行きに合わせて変化させることでオクルージョンを表現することを試みている。観点は異なるが、彼らの手法を用いて視認性が最大となるような状態で出力を行うことで、相対的に背景要素の視認性を下げることができると考えられる。彼らの本来の研究目的とは異なることを承知で言及すると、彼らの研究では背景光に OST-HMD の出力光が重畳し、それを人間の目で観察する過程を画像のブレンディングを用いてシミュレートしているが、その際に OST-HMD の出力レンジや色再現性を考慮しておらず、この手法を観測される光の背景要素を取り除くタスクに応用することは難しいと考えられる。

2.3 本研究の位置づけ

Langlotz らは TVI map によって人間の明るさ知覚, elevation factor map によって人間の空間周波数とコントラスト知覚の特性を考慮した画像処理手法を用いることで, OST-HMD の狭いダイナミックレンジの中でも, あたかもそのダイナミックレンジを超えているかのように提示することを目指した手法を提案した. 一方でその後のユーザスタディによってその画像のクオリティを問うたが, そのクオリティは単純に仮想物体から現実光の成分を差し引く手法とくらべて有意差が表れなかった. そこで本研究では, あるオフセットを加えても人間の知覚には違いが感じられないと考え, その差分に背景画像と仮想物体画像に応じたオフセットを足し上げる単純なソフトウェアの改善のみで負の光量を出力せずに背景光の影響を取り除いた上で仮想物体を提示する方法を提案する.

第 3 章 OST-HMD 入力画像 - Scene-Camera 出力画像間の色変換モデル

本研究では現行の標準的な OST-HMD に搭載されている透過ディスプレイと Scene-Camera のみを用いて、光をオクルージョンマスクなどで遮断することなく半透明感を軽減したい．そのためには背景光を把握する必要があるため、ここでは Eye-Camera を用いて OST-HMD 内に入射する背景光を把握する．しかし背景光が把握できたとしても、このままこちらが用意した仮想物体画像と Eye-Camera から得た背景画像の差分を OST-HMD への入力画像（指令値）としたところで、指令値がそのまま Eye-Camera の出力画像の値に対応しているわけではない．このため正しくその差分を出力できない．そこで OST-HMD へ与えた入力画像（指令値）が Eye-Camera でどのような値となって記録されるのかを把握することで、Eye-Camera から見ても正しい差分を出力できるようにする．ただし実際にユーザが OST-HMD を装着することを考えると、本当の目の位置に Eye-Camera を置くことはできない．そこで OST-HMD の外部に Scene-Camera を新たに設置し、この Scene-Camera の出力画像から Eye-Camera の出力画像を推定することを考える．よって、本研究では OST-HMD への入力画像（指令値） - Eye-Camera の出力画像間のモデル化と、Scene-Camera の出力画像 - Eye-Camera の出力画像間のモデル化を行うことで、Scene-Camera の出力画像から OST-HMD への入力画像（指令値）を計算する．

3.1 OST-HMD 入力画像 - Eye-Camera 出力画像間の色変換モデル

いま、図 3.1 のような OST-HMD とそれが出力する光と背景から到来する光の両方を観測する Eye-Camera、背景光を観測する Scene-Camera、また OST-HMD への指令値を生成する Controller を考える．ここで OST-HMD、Eye-Camera、Scene-Camera の動作を記述する関数を F_D , F_E , F_S とする．また A を OST-HMD の減光フィルタの動作を記述する 3×3 行列とする．ここで F_D は OST-HMD への指令値 $\vec{i}_H$ を入力、OST-HMD が放出する現実光 $\vec{I}_H$ を出力とする関

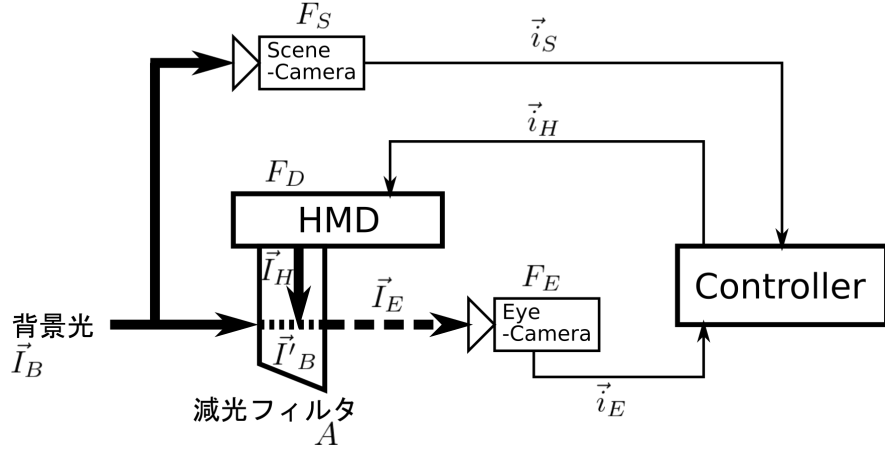


図 3.1: 各記号の関係図

数である．また F_E はある現実光 $\vec{I}$ を入力とし， $\vec{I}$ が Eye-Camera に入射したときの Eye-Camera の出力値 $\vec{i}_E$ を出力とする関数である．また F_S は現実光 $\vec{I}$ を入力とし， $\vec{I}$ が Scene-Camera に入射したときの Scene-Camera の出力値 $\vec{i}_S$ を出力とする関数である．また A は OST-HMD の減光フィルタの作用を表しており，OST-HMD を通過する前の背景光 $\vec{I}_B$ を入力とし，通過後の背景光 $\vec{I}'_B$ を出力とする．このとき，OST-HMD にある指令値 $\vec{i}_H$ を入力したときに出力される現実光 $\vec{I}_H$ は各色チャンネルにおける $\gamma_r, \gamma_g, \gamma_b$ を用いたガンマ変換の後， 3×3 行列である M_D によって線形な色混合が起こることを考えると

$$\vec{I}_H = F_D[\vec{i}_H] \quad (3.1.1)$$

のように表すことができる．ここで，

$$\begin{aligned} F_D[\vec{i}] &= M_D \begin{bmatrix} i_r^{\gamma_r} \\ i_g^{\gamma_g} \\ i_b^{\gamma_b} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{\gamma_r} \\ i_g^{\gamma_g} \\ i_b^{\gamma_b} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

である．

また，ある光 I_H が OST-HMD から出力され，OST-HMD の減光フィルタを通過した背景光 I_B に重畳した状態で Eye-Camera に入射することを考えると，線形特性をもつカメラを用いることで Eye-Camera の出力値 i_E は

$$\begin{aligned}\vec{i}_E &= F_E [\vec{I}_E] \\ &= F_E [\vec{I}_H + \vec{I}_B] \\ &= F_E [F_D[\vec{i}_H] + A\vec{I}_B]\end{aligned}\tag{3.1.3}$$

でモデル化される．ただし，

$$A = \begin{bmatrix} a_r & 0 & 0 \\ 0 & a_g & 0 \\ 0 & 0 & a_b \end{bmatrix}\tag{3.1.4}$$

$$\begin{aligned}F_E[\vec{I}] &= M_E \begin{bmatrix} I_r \\ I_g \\ I_b \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_r \\ I_g \\ I_b \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{3.1.5}$$

である．

3.2 Scene-Camera 出力画像 - Eye-Camera 出力画像間の色変換モデル

式 4.1.12 において $\vec{i}_B$ は Eye-Camera から得る必要があるが，前述の通り，実応用においては Eye-Camera を直接用いることはできないため，Scene-Camera で撮影される画像から Eye-Camera で撮影される画像を推定することを考える．いま，Scene-Camera から得られる画像を $\vec{i}_{B,S}$ とする．これを Eye-Camera から得られる画像である $\vec{i}_{B,E}$ に変換することを考える．ここで，ある特定の 3 つの周波

数成分 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ をもつ光 $I(\lambda_r), I(\lambda_g), I(\lambda_b)$ が Scene-Camera と Eye-Camera に入射すると、それぞれのカメラに存在する 3 色の分光感度関数 $S_r(\lambda), S_g(\lambda), S_b(\lambda), E_r(\lambda), E_g(\lambda), E_b(\lambda)$ に基づいた積分により、両カメラの出力値 $\vec{i}_S, \vec{i}_E$ が

$$\begin{aligned}
\vec{i}_S &= \begin{bmatrix} i_{Sr} \\ i_{Sg} \\ i_{Sb} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \int_V S_r(\lambda) I(\lambda) d\lambda \\ \int_V S_g(\lambda) I(\lambda) d\lambda \\ \int_V S_b(\lambda) I(\lambda) d\lambda \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} S_r(\lambda_r) I(\lambda_r) + S_r(\lambda_g) I(\lambda_g) + S_r(\lambda_b) I(\lambda_b) \\ S_g(\lambda_r) I(\lambda_r) + S_g(\lambda_g) I(\lambda_g) + S_g(\lambda_b) I(\lambda_b) \\ S_b(\lambda_r) I(\lambda_r) + S_b(\lambda_g) I(\lambda_g) + S_b(\lambda_b) I(\lambda_b) \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} S_r(\lambda_r) & S_r(\lambda_g) & S_r(\lambda_b) \\ S_g(\lambda_r) & S_g(\lambda_g) & S_g(\lambda_b) \\ S_b(\lambda_r) & S_b(\lambda_g) & S_b(\lambda_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(\lambda_r) \\ I(\lambda_g) \\ I(\lambda_b) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.2.1}$$

のように計算される。ただし $\lambda \in V$ であり、 V はカメラが観測可能な波長の集合である。また同様に Eye-Camera においても減光フィルタ $\alpha(\lambda)$ の影響を考慮に入れると

$$\begin{aligned}
\vec{i}_E &= \begin{bmatrix} i_{Er} \\ i_{Eg} \\ i_{Eb} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \int_V E_r(\lambda) \alpha(\lambda) I(\lambda) d\lambda \\ \int_V E_g(\lambda) \alpha(\lambda) I(\lambda) d\lambda \\ \int_V E_b(\lambda) \alpha(\lambda) I(\lambda) d\lambda \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} E_r(\lambda_r) \alpha(\lambda_r) I(\lambda_r) + E_r(\lambda_g) \alpha(\lambda_g) I(\lambda_g) + E_r(\lambda_b) \alpha(\lambda_b) I(\lambda_b) \\ E_g(\lambda_r) \alpha(\lambda_r) I(\lambda_r) + E_g(\lambda_g) \alpha(\lambda_g) I(\lambda_g) + E_g(\lambda_b) \alpha(\lambda_b) I(\lambda_b) \\ E_b(\lambda_r) \alpha(\lambda_r) I(\lambda_r) + E_b(\lambda_g) \alpha(\lambda_g) I(\lambda_g) + E_b(\lambda_b) \alpha(\lambda_b) I(\lambda_b) \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} E_r(\lambda_r) & E_r(\lambda_g) & E_r(\lambda_b) \\ E_g(\lambda_r) & E_g(\lambda_g) & E_g(\lambda_b) \\ E_b(\lambda_r) & E_b(\lambda_g) & E_b(\lambda_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha(\lambda_r) & 0 & 0 \\ 0 & \alpha(\lambda_g) & 0 \\ 0 & 0 & \alpha(\lambda_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(\lambda_r) \\ I(\lambda_g) \\ I(\lambda_b) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.2.2}$$

と表せる。これらより、 $\vec{i}_S$ から $\vec{i}_E$ への変換は

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} i_{Er} \\ i_{Eg} \\ i_{Eb} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E_r(\lambda_r) & E_r(\lambda_g) & E_r(\lambda_b) \\ E_g(\lambda_r) & E_g(\lambda_g) & E_g(\lambda_b) \\ E_b(\lambda_r) & E_b(\lambda_g) & E_b(\lambda_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha(\lambda_r) & 0 & 0 \\ 0 & \alpha(\lambda_g) & 0 \\ 0 & 0 & \alpha(\lambda_b) \end{bmatrix} \\
&\quad \begin{bmatrix} S_r(\lambda_r) & S_r(\lambda_g) & S_r(\lambda_b) \\ S_g(\lambda_r) & S_g(\lambda_g) & S_g(\lambda_b) \\ S_b(\lambda_r) & S_b(\lambda_g) & S_b(\lambda_b) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{Sr} \\ i_{Sg} \\ i_{Sb} \end{bmatrix} \\
&= M_E A M_S^{-1} \begin{bmatrix} i_{Sr} \\ i_{Sg} \\ i_{Sb} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.2.3}$$

のようにモデル化される．ただし

$$A = \begin{bmatrix} a_r & 0 & 0 \\ 0 & a_g & 0 \\ 0 & 0 & a_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha(\lambda_r) & 0 & 0 \\ 0 & \alpha(\lambda_g) & 0 \\ 0 & 0 & \alpha(\lambda_b) \end{bmatrix} \tag{3.2.4}$$

とした．これらより， $\vec{i}_S$ から $\vec{i}_B$ への変換は $\vec{i}_B = \vec{i}_E$ とすることで

$$\vec{i}_B = \vec{i}_E = \begin{bmatrix} i_{Er} \\ i_{Eg} \\ i_{Eb} \end{bmatrix} = M_E A M_S^{-1} \begin{bmatrix} i_{Sr} \\ i_{Sg} \\ i_{Sb} \end{bmatrix} \tag{3.2.5}$$

として計算できる．

第 4 章 色変換モデルを用いた仮想物体提示手法

構築した色変換モデルによって、Eye-Camera で観測されて欲しい目標値から、その目標値を実現するために必要な OST-HMD に入力する値を計算することができるようになった。しかし本研究の目標である半透明感に着目すると、どのような目標値を入力することが半透明感の低減に繋がるのかはわからない。そこで、本章では従来までに考えられてきた手法と、提案手法とに分けて、目標値を定める手法について説明する..

4.1 従来の提示手法

4.1.1 仮想物体をそのまま提示する手法: naive

仮想物体の輝度値を $\vec{i}_V$ として、通常の OST-HMD で行われているように指令値をそのまま何も操作せずに $\vec{i}_H = \vec{i}_V$ のように与えると、式 3.1.3 と $\vec{i}_B = F_E [A\vec{I}_B]$ より

$$\begin{aligned}\vec{i}_E &= F_E \left[F_D \left[\vec{i}_H \right] + A\vec{I}_B \right] \\ &= F_E \left[F_D \left[\vec{i}_V \right] + F_E^{-1} \left[\vec{i}_B \right] \right] \\ &= F_E \left[F_D \left[\vec{i}_V \right] \right] + F_E \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_B \right] \right] \\ &= F_E \left[F_D \left[\vec{i}_V \right] \right] + \vec{i}_B\end{aligned}\tag{4.1.1}$$

のように表される。しかしこのままでは背景光 $\vec{i}_B$ を含む項が残るため、Eye-Camera で OST-HMD を覗いた場合に背景と混合した半透明な仮想物体が観測される問題がある。

4.1.2 差分を出力する手法: simple difference

この問題を解決するため、任意の $\vec{i}_E$ を再現する OST-HMD への指令値 $\vec{i}_H$ について考える．式 3.1.3 の両辺を $F_E^{-1}[\vec{i}]$ に代入し

$$F_E^{-1}[\vec{i}_E] = F_D[\vec{i}_H] + A\vec{I}_B \quad (4.1.2)$$

$\vec{I}_B = A^{-1}F_E^{-1}[\vec{i}_B]$ より

$$\begin{aligned} F_E^{-1}[\vec{i}_E] &= F_D[\vec{i}_H] + AA^{-1}F_E^{-1}[\vec{i}_B] \\ &= F_D[\vec{i}_H] + F_E^{-1}[\vec{i}_B] \end{aligned} \quad (4.1.3)$$

$F_D[\vec{i}_H] = \dots$ の形にするため移項すると

$$F_D[\vec{i}_H] = F_E^{-1}[\vec{i}_E] - F_E^{-1}[\vec{i}_B] \quad (4.1.4)$$

両辺を $F_D^{-1}[\vec{i}]$ に代入し

$$\vec{i}_H = F_D^{-1}[F_E^{-1}[\vec{i}_E] - F_E^{-1}[\vec{i}_B]] \quad (4.1.5)$$

$F_E^{-1}[\vec{i}]$ は線形な演算であるので

$$\vec{i}_H = F_D^{-1} \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_E - \vec{i}_B \right] \right] \quad (4.1.6)$$

$\vec{i}_E$ は再現したい任意の値で与えられるため仮想物体の輝度値を $\vec{i}_V = \vec{i}_E$ とすると

$$\vec{i}_H = F_D^{-1} \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_V - \vec{i}_B \right] \right] \quad (4.1.7)$$

のように表される．ここで得られた $\vec{i}_H$ を式 3.1.3 に代入すると

$$\begin{aligned}
\vec{i}_E &= F_E \left[F_D \left[\vec{i}_H \right] + A \vec{I}_B \right] \\
&= F_E \left[F_D \left[F_D^{-1} \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_V - \vec{i}_B \right] \right] \right] + F_E^{-1} \left[\vec{i}_B \right] \right] \\
&= F_E \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_V - \vec{i}_B \right] + F_E^{-1} \left[\vec{i}_B \right] \right] \\
&= F_E \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_V - \vec{i}_B + \vec{i}_B \right] \right] \\
&= F_E \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_V \right] \right] \\
&= \vec{i}_V
\end{aligned} \tag{4.1.8}$$

となり、式 4.1.1 では残っていた $\vec{i}_B$ を打ち消すことができるため、式 4.1.7 を OST-HMD への入力画像とすることで背景光の影響を完全に排除した上での提示が可能になる。しかし simple difference は式 4.1.8 をみると、 $\vec{i}_V < \vec{i}_B$ の場合に $\vec{i}_H$ が負の値となってしまうため、この場合 HoloLens を代表とする現行の OST-HMD では厳密には提示不可能となる。このため、負の値となった場合には出力値を 0 とすることで対処する他ない。よって、このような OST-HMD の提示可能な範囲を考慮した上で半透明感の低減を行う手法が求められる。

4.1.3 差分を引き上げて提示する手法: pull up

そのような OST-HMD の提示可能な範囲を考慮した最も簡単な手法として、仮想物体画像と背景画像の差分だけでなく、それらの画像に応じたオフセットを足し上げることで負の光量を出力せずに背景光の影響を取り除いた上で仮想物体を提示する手法が考えられる。この提示方法は仮想物体領域内の $i_B(x, y, c)$ と $i_V(x, y, c)$ の差分の x, y, c に関する最大値を引き上げることで $\vec{i}_H$ が負の値になることを避け、無彩色のオフセット成分に仮想物体画像を重ねることになる。このため、この提示手法を使っても元の仮想物体画像とくらべて色相を変化させることがない。ただし $i_V(x, y, c)$ や $i_B(x, y, c)$ のような表記は $\vec{i}_V$ や $\vec{i}_B$ を空間座標 x, y と色チャンネル c を引数とする関数として表記したものである。いま $i_V(x, y, c)$ と $i_B(x, y, c)$ が与えられたときに

$$\vec{i}_H = F_D^{-1} \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_V \right] \right] \quad (4.1.9)$$

とおいた上で

$$\begin{aligned} \vec{i}_V \\ = i_V(x, y, c) + \max \left(\max_{x, y, c} [M(x, y)(i_B(x, y, c) - i_V(x, y, c))] , 0 \right) - i_B(x, y, c) \end{aligned} \quad (4.1.10)$$

ここで $M(x, y)$ は仮想物体領域内で 1, 仮想物体領域外で 0 をとるマスク画像であり

$$M(x, y) = \begin{cases} 1 & (x, y) \in S_V \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (4.1.11)$$

のように表される．また S_V は仮想物体領域内の座標の集合を示す．これにより $\vec{i}_H \geq 0$ が常に保証され，かつ背景光の AC 成分を取り除くことができるため，仮想物体が半透明に認識されることはなくなると考えられる．実際に式 3.1.3 に式 4.1.9 を代入する

$$\begin{aligned} \vec{i}_E &= F_E \left[F_D \left[\vec{i}_H \right] + A\vec{I}_B \right] \\ &= F_E \left[F_D \left[F_D^{-1} \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_V \right] \right] \right] + F_E^{-1} \left[\vec{i}_B \right] \right] \\ &= F_E \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_V \right] + F_E^{-1} \left[\vec{i}_B \right] \right] \\ &= F_E \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_V + \vec{i}_B \right] \right] \\ &= F_E \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_V + \max \left(\max_{x, y, c} [M(x, y)(i_B(x, y, c) - i_V(x, y, c))] , 0 \right) - \vec{i}_B + \vec{i}_B \right] \right] \\ &= \vec{i}_V + \max \left(\max_{x, y, c} [M(x, y)(i_B(x, y, c) - i_V(x, y, c))] , 0 \right) \end{aligned} \quad (4.1.12)$$

となり，背景光が直接関わる項を打ち消せていることがわかる．しかし一方で新たに定数成分 $\max(\max_{x,y,c} [M(x,y)(i_B(x,y,c) - i_V(x,y,c))], 0)$ が加わっており，これが人間の知覚にどう関わるかが問題となる．

4.2 提案する提示手法

前述の通り pull up では simple difference にくらべ背景に応じて OST-HMD の出力限界に達しやすい．このため，ここでは pull up の改善方法について考える．pull up では OST-HMD への入力画像 $\vec{i}_H$ を

$$\vec{i}_H = F_D^{-1} \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}'_V \right] \right] \quad (4.2.1)$$

とおいた上で

$$\begin{aligned} i'_V(x,y,c) \\ = i_V(x,y,c) + \max \left(\max_{x,y,c} [M(x,y)(i_B(x,y,c) - i_V(x,y,c))], 0 \right) - i_B(x,y,c) \end{aligned} \quad (4.2.2)$$

のようにしていたが，単純な改良としてオフセットを画像の特性に応じて足し上げる量のある程度妥協することを考える．そこで，ある画像 $i(x,y,c)$ の q クォンタイルとなる数を入力する関数 $Q(i(x,y,c), q)$ を用いて OST-HMD への入力画像を $i_H(x,y,c)$ とするような方法を考える．まずオフセットを pull up の形を踏襲し $i_B(x',y',c) - i_V(x',y',c)$ の x',y',c とする．ここで $x',y' \in S_V$ であり S_V は仮想物体領域の x,y 座標の集合である．また観測結果に Eye-Camera が観測可能な最大値を超える箇所が存在した場合には，またクォンタイル値をオフセットとして，仮想物体の輝度値を Eye-Camera が観測可能な最大値まで十分に活かせるようにスケーリングを行うことを考え， $i'_V(x,y,c)$ に Eye-Camera が観測可能な最大値を超える箇所が存在しない場合には $i'_V(x,y,c)$ を出力し，存在する場合には $i''_V(x,y,c)$ を出力する

$$C(x, y, c) = Q(\max((i_B(x', y', c) - i_V(x', y', c)), 0), q) - i_B(x, y, c) \quad (4.2.3)$$

$$i'_V(x, y, c) = i_V(x, y, c) + C(x, y, c) \quad (4.2.4)$$

$$\begin{aligned} i''_V(x, y, c) \\ = \{1 - Q(\max((i_B(x', y', c) - i_V(x', y', c)), 0), q)\} i_V(x, y, c) + C(x, y, c) \end{aligned} \quad (4.2.5)$$

のような形とした． pull up では単に $i_B(x, y, c) - i_V(x, y, c)$ の仮想物体がある座標 x, y での x, y, c に関する最大値まで引き上げることを行っていたが，この方法ではそこから妥協する度合いを 0 以上 1 以下の値をもちうるクォンタイル q というパラメータで設定する．しかしこの場合，この q をどのような画像に対してどのように定めるかが問題となる．

第 5 章 OST-HMD 入力画像 - Scene-Camera 出力画像間の幾何学的キャリブレーションと光学的キャリブレーション

前章では背景画像に対して適応的に OST-HMD の映像提示を行うため、その色変換モデルを構築し、その色変換モデルに基づいた映像提示手法について説明した。本章ではその提示手法を実装するにあたって必要となる幾何学的・光学的なそれぞれのキャリブレーションについて述べる。ここで本研究では、それぞれのハードウェアで扱われる画像のピクセル位置の対応関係を明らかにすることを幾何学的キャリブレーションと呼び、前述の色変換モデルのパラメータを求めることを光学的キャリブレーションと呼ぶ。また 3 章で述べたように、OST-HMD の制御を行うために必要な Eye-Camera から得られる画像を Scene-Camera からの変換によって得る。このため、本キャリブレーションでは図 5.1 のように OST-HMD 入力画像と Eye-Camera 出力画像間に加えて Scene-Camera 出力画像と Eye-Camera 出力画像間の 2 つの幾何学的・光学的関係（実線）を求めることで、最終的に Scene-Camera 出力画像と OST-HMD 入力画像との関係（点線）を得る。

5.1 幾何学的キャリブレーション

5.1.1 概要

本節では幾何学的な対応関係を記述するためのキャリブレーションについて述べる。本研究においては特に OST-HMD と Eye-Camera, Scene-Camera と Eye-Camera で扱う画像のピクセル位置の対応関係を明らかにすることを幾何学的キャリブレーションと呼ぶ。具体的には、OST-HMD と Eye-Camera 間は OST-HMD へ入力する画像のピクセル位置 (x_H, y_H) と、OST-HMD から出力された光を Eye-Camera が観測する画像のピクセル位置 (x_E, y_E) の対応関係を求めることであり、もう一方の Scene-Camera と Eye-Camera 間は、背景光を Scene-Camera と Eye-Camera がそれぞれ観測する画像のピクセル位置 (x_S, y_S) と (x_E, y_E) の対応関係を求めることである。

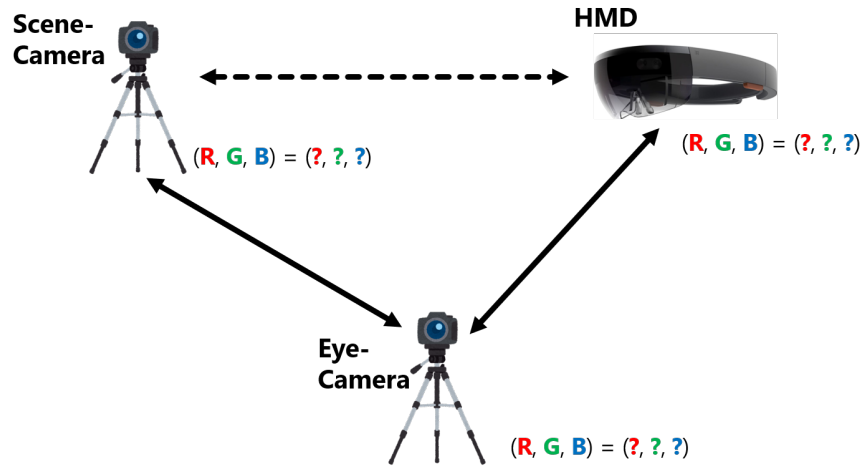


図 5.1: 本研究のキャリブレーションにおけるハードウェアの幾何学的・光学的関係図

幾何学的な画像のキャリブレーション方法には、アフィン変換を用いる方法や、透視変換を用いる方法などがある [29] が、事前の内部・外部両方のカメラパラメータのキャリブレーションが必要であるため、本研究ではそれが不要なグレイコードを用いたキャリブレーション [30] を採用する。

グレイコードを用いたキャリブレーションは空間コード法的一种であり、Projector Camera System (PCS) で主に用いられ、投影に用いた画像とスクリーンに投影された映像を撮影した画像とのピクセル位置の対応関係を求めることに使われる。またグレイコードを用いる理由は、カウンタが 1 進むことで変化するビットの数が常に 1 であるという性質を持つため、あるビットの値を誤って読み取った場合に大きく違う値に解釈する心配がないためといわれている [25]。キャリブレーション手順は以下の通りである。

1. 投影画像中のピクセル位置 (x 座標か y 座標のどちらか) に対応する 2 進数表現へ変換する
2. 2 進数コードをグレイコードに変換する
3. グレイコードの各桁に対応する画像を出力しカメラで撮影する
4. 3. をすべてのグレイコードの桁に対応する画像で行う

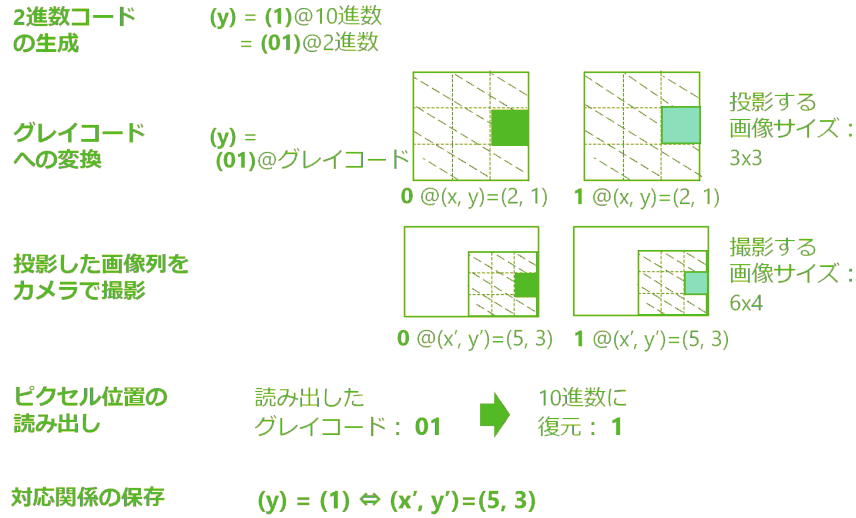


図 5.2: グレイコードキャリブレーションの例 (y 軸)

5. 撮影した画像列に埋め込まれたグレイコードからピクセル位置を読み出す
6. 2 画像のピクセル位置の対応関係を保存する
7. 1.-6. を x 座標と y 座標両方のピクセル位置に対応するコードで行う

図 5.2 にグレイコードキャリブレーションの例を示す．ここでは投影する画像（サイズ： 3×3 ）の座標を (x, y) ，カメラで撮影した画像（サイズ： 6×4 ）の座標を (x', y') とする．この図では縦 (y 軸) に対するコードを提示しており，このとき撮影した画像の座標 $(x', y') = (5, 3)$ においてグレイコード 01 が得られたときに，これを 10 進数に復号することで撮影画像の座標 $(x', y') = (5, 3)$ に対応する投影画像の y 座標が $(y) = (1)$ であることが判明する過程を示している．

5.1.2 本研究への応用

ここではグレイコードを用いたキャリブレーションを本研究の実験環境に応用する方法について述べる．前述のように OST-HMD 入力画像と Eye-Camera 出力画像間と Scene-Camera 出力画像と Eye-Camera 出力画像間の 2 つに分けて行われる．はじめに OST-HMD と Eye-Camera 間の幾何学的キャリブレーションについて

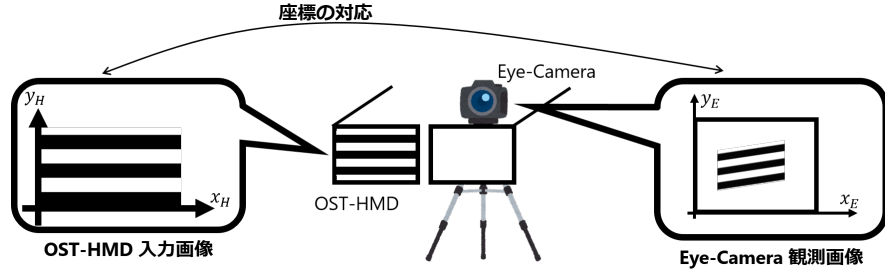


図 5.3: OST-HMD - Eye-Camera 間の幾何学的キャリブレーションにおける画像上の座標の対応

て説明する．基本的には前述のグレイコードキャリブレーションの手順に沿って行われるが，映像の出力に用いるハードウェアがプロジェクタではなく OST-HMD であることに注意する．図 5.3 は暗室内で OST-HMD からグレイコード画像を出力し，その映像を Eye-Camera で捉えるというデータ収集の過程を示している．また，グレイコード生成に用いたビット数は OST-HMD の出力解像度が 1280×720 であることから $\lfloor \log_2 (\max (1280, 720)) \rfloor + 1 = 11$ 桁とした．

次に Scene-Camera と Eye-Camera 間のデータ収集過程について説明する．この場合も同様に前述のグレイコードキャリブレーションの手順に沿うが，こちらは映像の出力に用いるハードウェアが LCD であることに注意する．図 5.4 は暗室内で OST-HMD からグレイコード画像を LCD から出力し，その映像を Scene-Camera と Eye-Camera の両方で捉えるというデータ収集の過程を示している．また，グレイコード生成に用いたビット数は LCD の出力解像度が 3840×2160 であることから $\lfloor \log_2 (\max (3840, 2160)) \rfloor + 1 = 12$ 桁とした．ただし，このままでは Scene-Camera と Eye-Camera が直接対応づけられたわけではない．実際には一旦 LCD の座標を通して双方のカメラのピクセル位置が対応付けられる．

5.2 光学的キャリブレーション

ここでは式 4.1.9 を用いた OST-HMD の制御を実現するための光学的キャリブレーションについて説明する．まず本研究における光学的キャリブレーションの定義は制御式 4.1.9 と式 3.2.5 中の Eye-Camera で実現したい目標値から OST-HMD

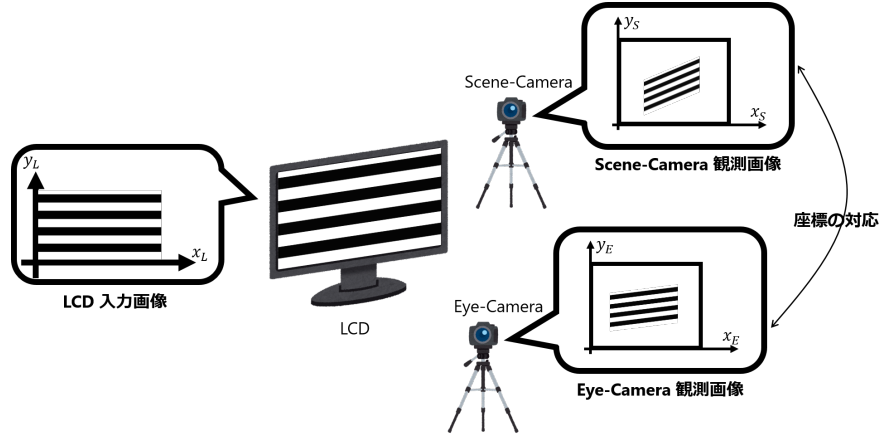


図 5.4: Scene-Camera - Eye-Camera 間の幾何学的キャリブレーションにおける画像上の座標の対応

へ入力する指令値を生成する関数

$$F_D^{-1} \left[F_E^{-1} \left[\vec{i} \right] \right] \quad (5.2.1)$$

と Scene-Camera で得られる画像から Eye-Camera で得られる画像を推定する関数

$$F_E \left[AF_S^{-1} \left[\vec{i} \right] \right] \quad (5.2.2)$$

のパラメータを求めることである．3章で述べたとおり，これらの関数はガンマ変換や行列の積によって構成されており，それぞれ

$$F_D^{-1} \left[F_E^{-1} \left[\vec{i} \right] \right] = G_D^{-1} \left[M_D^{-1} M_E^{-1} \vec{i} \right] \quad (5.2.3)$$

$$F_E \left[AF_S^{-1} \left[\vec{i} \right] \right] = M_E A M_S^{-1} \vec{i} \quad (5.2.4)$$

のように表される．ただし

$$G_D^{-1} \begin{bmatrix} \vec{i} \end{bmatrix} = G_D^{-1} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r \\ i_g \\ i_b \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_r^{\frac{1}{\gamma_r}} \\ i_g^{\frac{1}{\gamma_g}} \\ i_b^{\frac{1}{\gamma_b}} \end{bmatrix} \quad (5.2.5)$$

とした．本研究における光学的キャリブレーションを完了するためには，これらの行列や γ の値を求める必要がある．しかし物理的な輝度としての $\vec{I}$ を直接観測することは難しく， F_E や F_S ， F_D といった関数をそれぞれ単体で求めることが難しい．また本研究の目的を考えると，これらの関数のパラメータをそれぞれ求める必要はなく，式 5.2.3 と式 5.2.4 の入出力さえ一致していれば良い．このためカメラの出力 $\vec{i}_E$ ， $\vec{i}_S$ や OST-HMD への指令値である $\vec{i}_H$ のみを入出力とし，かつ可能な限り少ないパラメータでの表現を考えると

$$F_D^{-1} \left[F_E^{-1} \begin{bmatrix} \vec{i} \end{bmatrix} \right] = G_D^{-1} \left[M_D^{-1} M_E^{-1} \vec{i} \right] = G_D^{-1} \left[M_{EAD}^{-1} \vec{i} \right] \quad (5.2.6)$$

$$F_E \left[A F_S^{-1} \begin{bmatrix} \vec{i} \end{bmatrix} \right] = M_E A M_S^{-1} \vec{i} = M_{EAS} \vec{i} \quad (5.2.7)$$

のように 3×3 行列もしくは 3×3 行列と rgb 各チャンネルに対応するガンマ値 $\gamma_r, \gamma_g, \gamma_b$ を用いた表現となる．

5.2.1 画像ペアデータ収集

ここから前述の表現で用いられるパラメータ M_{EAD} ， M_{EAS} ， γ_r ， γ_g ， γ_b を求めるため，この入出力となる $\vec{i}_E$ ， $\vec{i}_S$ や $\vec{i}_H$ を収集する方法について述べる．データ収集は以下の手順に従っての図 5.5 ように行われる．

1. OST-HMD への指令値である $\vec{i}_H$ を 0 以上 1 以下の一様分布に従って生成
2. 生成された $\vec{i}_H$ を OST-HMD に入力
3. 出力された映像を Eye-Camera で捉え i_E として記録

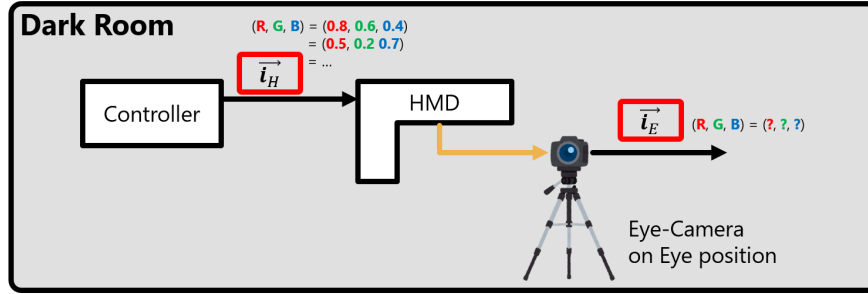


図 5.5: OST-HMD - Eye-Camera 間の光学的キャリブレーションのためのデータ収集

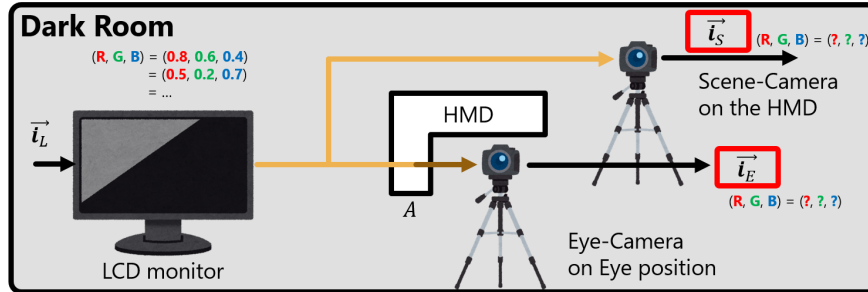


図 5.6: Scene-Camera - Eye-Camera 間の光学的キャリブレーションのためのデータ収集

この一連のデータ収集を 767 回繰り返し、最終的に 767 組の $\{\vec{i}_H, \vec{i}_E\}$ が得られる。

一方 Scene-Camera - Eye-Camera 間のキャリブレーションは以下の手順に従って図 5.6 のように行われる。

1. LCD への指令値である $\vec{i}_L$ を 0 以上 1 以下の一様分布に従って生成
2. 生成された $\vec{i}_L$ を LCD に入力
3. 出力された映像を Scene-Camera と Eye-Camera で捉え $\vec{i}_S$, $\vec{i}_E$ として記録

この一連のデータ収集を 767 回繰り返し、最終的に 767 組の $\{\vec{i}_S, \vec{i}_E\}$ が得られる。

5.2.2 パラメータ最適化

ここから前述のように集められるデータ $\{\vec{i}_H, \vec{i}_E\}$ と $\{\vec{i}_S, \vec{i}_E\}$ を用いてパラメータ M_{EAD} , M_{EAS} , γ_r , γ_g , γ_b を求める方法について述べる．本研究ではパラメータ最適化に勾配降下法 (Gradient Descent: GD) を用いる．いま勾配降下法で用いる誤差関数を OST-HMD - Eye-Camera 間のキャリブレーションでは

$$L_{ED}(M_{EAD}, \gamma_r, \gamma_g, \gamma_b) = \frac{1}{N_{ED}} \sum_{n \in S_{ED}} \left(\vec{i}_{E,n} - M_{EAD} G_D \left[\vec{i}_{H,n} \right] \right)^2 \quad (5.2.8)$$

とし, Scene-Camera - Eye-Camera 間のキャリブレーションでは

$$L_{ES}(M_{EAS}) = \frac{1}{N_{ES}} \sum_{m \in S_{ES}} \left(\vec{i}_{E,m} - M_{EAS} \vec{i}_{S,m} \right)^2 \quad (5.2.9)$$

とする．ここで S_{ED}, S_{ES} は更新時に毎度 767 組のサンプル全体の中から選ばれる複数の $\{\vec{i}_H, \vec{i}_E\}$ と $\{\vec{i}_S, \vec{i}_E\}$ に関するインデックスである．また $\vec{i}_{E,n}, \vec{i}_{H,n}$ はサンプル全体から選ばれた N_{ED} 組の $\{\vec{i}_H, \vec{i}_E\}$ を示し, $\vec{i}_{E,m}, \vec{i}_{S,m}$ も同様にサンプル全体から選ばれた N_{ES} 組の $\{\vec{i}_E, \vec{i}_S\}$ を示す．このとき各パラメータ M_{EAD} , M_{EAS} , γ_r , γ_g , γ_b のうち, いずれかを w とおいたときの更新式は

$$w_{new} = w_{old} + \Delta w \quad (5.2.10)$$

となる．ここで w_{new} は更新後の w , w_{old} は更新前の w , Δw は w の更新差分を表している．また Δw は w が関わる誤差関数 $L(w)$ の w に関する偏微分 $\frac{\partial L}{\partial w}$ に基づいて決定され, より詳細な計算は Momentum 法 [26] や Adam [27], Nadam [28] などの更新アルゴリズムに依存する．本研究ではこれら 3 つのアルゴリズムを試した結果, Nadam が最も少ない更新回数で同じ誤差値に到達したため Nadam を用いる．

第 6 章 実験

ここでは大きく 2 つの実験を行う。1 つは本システムによって背景光の影響を数式の通りに除去できているかを確認することが目的の実験である。もう 1 つは、提案手法を拡張した上であるパラメータを導入し、ある背景画像と仮想物体画像が与えられたときに、そのパラメータをどのような値に設定すれば良いのかを探ることを目的とした実験である。6.2 節では動作確認実験について、6.3 節では適切なパラメータを探る実験について説明する。

6.1 実験環境

次に本研究で用いるシステム構成を述べる。前述の OST-HMD の数理モデルに基づいた処理を行うにあたって、必要となるハードウェアとそれらを用いて構築した実験環境について述べる。まず周囲の光環境から隔離するための暗室をアルミフレームと暗幕を用いて構築する。その後 LCD を暗室内部に設置し、Scene-Camera, Eye-Camera と OST-HMD を固定した固定台を設置する。ここで固定台はアルミフレームを用いて組み立てられ、各ハードウェアは図 6.1 のように固定される。また図 6.2 は部屋全体の様子を示し、図中左には暗室内のハードウェアのおおよその位置関係が示されており、図中右には実際の暗室内の様子が示されている。ここで OST-HMD と LCD の間の距離は約 2[m] とする。

次に用いたハードウェアの詳細について表 6.1 と 6.2 に示す。ここで Controller である PC から OST-HMD である HoloLens への画像の送信は、TCP/IP を用いて画像を受信する HoloLens 用 Unity アプリケーションを作成し、これを用いて行われる。このため、画像の送信を開始してから HoloLens がその画像を表示するまで、HoloLens の動作 FPS に関係なく約 1 秒の遅れが生じる。一方でハードウェアの設定に関しては、HoloLens の設定輝度を最大値から 4 段階下げた状態、また Scene-Camera, Eye-Camera の露光時間をそれぞれ 30[ms], 50[ms] とする。

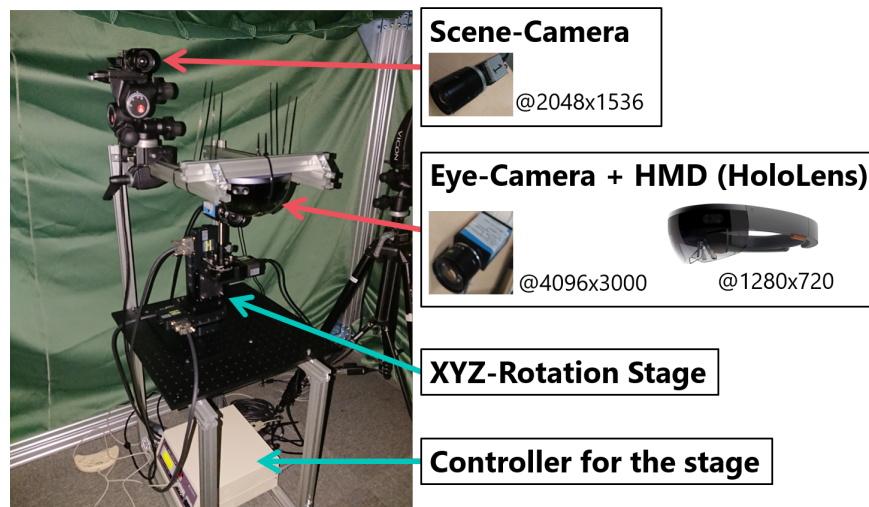


図 6.1: ハードウェアの構成

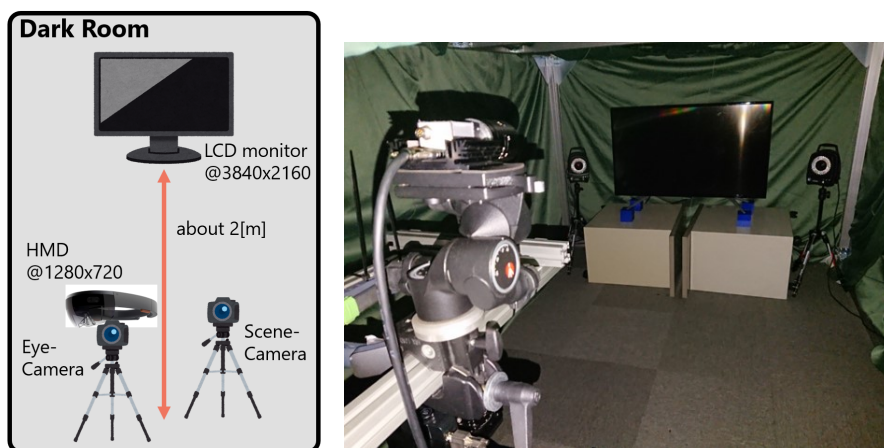


図 6.2: 暗室内の様子

6.2 半透明感低減手法の動作確認実験

ここでは実装したシステムを用いてあるパターンの背景に対して、正しく背景のオフセットを除く要素が除去できているかどうかを確認する。

6.2.1 動作確認方法

ここでは本システムの動作確認方法について述べる．本研究では 3 つの提示手法 (naive, simple difference, pull up) をそれぞれ

- naive: $\vec{i}_H = F_D^{-1} \left[F_E^{-1} \left[\vec{i}_V \right] \right]$ に基づいて仮想物体画像をそのまま提示する手法
- simple difference: 式 4.1.7 に基づいて仮想物体画像と背景画像の単純な差分を提示する手法
- pull up: 式 4.1.9 に基づいて仮想物体画像と背景画像の差分にあるオフセットを加えて提示する手法

のように定義する．これらの手法を $\vec{i}_V > \vec{i}_B$ となる場合と, $\vec{i}_V < \vec{i}_B$ となる場合の背景と仮想物体の組み合わせを用意し, これに対して意図どおりの動作が実現されているかを確認する．詳しくは以下に示す手順に沿って動作確認を行う．

表 6.1: ディスプレイの詳細

	OST-HMD	LCD
Company	Microsoft	Philips
Model Name	HoloLens	BDM4350UC/11
Serial Number	001500163656	AU0A1804000722
Resolution	1280 × 720	3840 × 2160
FPS	60 (for each of colors)	60

表 6.2: カメラの詳細

	Scene-Camera	Eye-Camera
Company	Baumer	The Imaging Source
Model Name	VCXU-31	DFK 38UX304
Serial Number	700003010252	45710313
Resolution	2048 × 1536	4096 × 3000

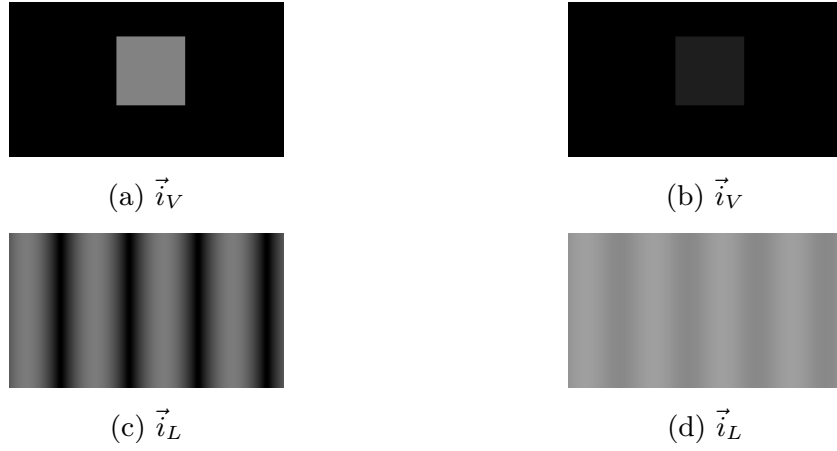


図 6.3: 入力画像 ($\vec{i}_V > \vec{i}_B$: 左側, $\vec{i}_V < \vec{i}_B$: 右側)

1. 仮想物体となるパターン画像 $\vec{i}_V$ の設定
2. 背景となるパターン画像 $\vec{i}_L$ の設定
3. 生成された $\vec{i}_L$ を LCD に入力
4. 出力された映像を Scene-Camera で捉え $\vec{i}_S$ として記録
5. $\vec{i}_S$ に基づいて $\vec{i}_B$ を計算
6. $\vec{i}_B$ と $\vec{i}_V$ から提示手法に基づいて $\vec{i}_H$ を計算し OST-HMD に入力
7. 出力された映像を Scene-Camera と Eye-Camera で捉え $\vec{i}_S$, $\vec{i}_E$ として記録

ここで仮想物体となるパターン画像 $\vec{i}_V$ と背景となるパターン画像 $\vec{i}_L$ は $\vec{i}_V > \vec{i}_B$ となる場合において図 6.3a と図 6.3c, $\vec{i}_V < \vec{i}_B$ となる場合において図 6.3b と図 6.3d を用いた。

6.2.2 動作結果

$\vec{i}_V > \vec{i}_B$ となる場合と, $\vec{i}_V < \vec{i}_B$ となる場合, それぞれにおいて各提示手法 (naive, simple difference, pull up) を用いた際の $\vec{i}_E$ を示す。

図 6.4a と図 6.4b より naive では $\vec{i}_V > \vec{i}_B$ となる場合と $\vec{i}_V < \vec{i}_B$ となる場合の両方で背景の波模様が観測される。また図 6.4c と図 6.4d より simple difference を

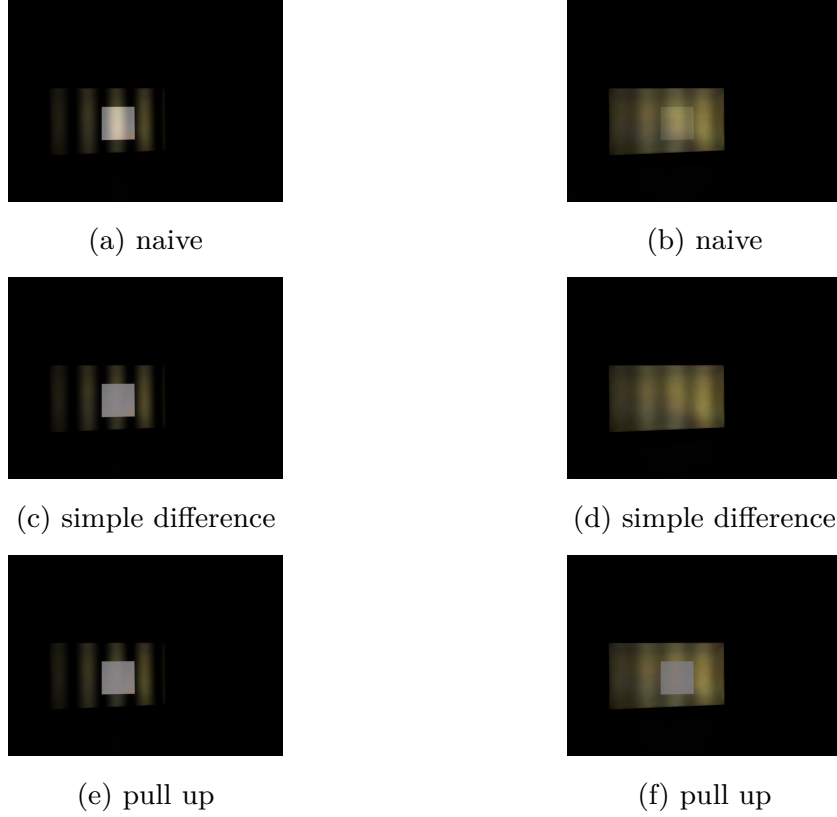
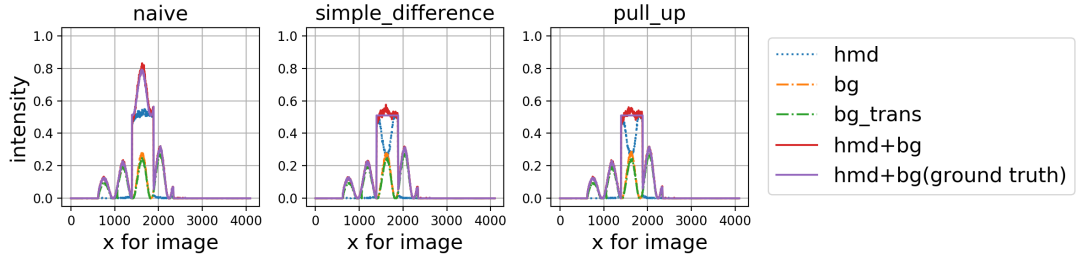


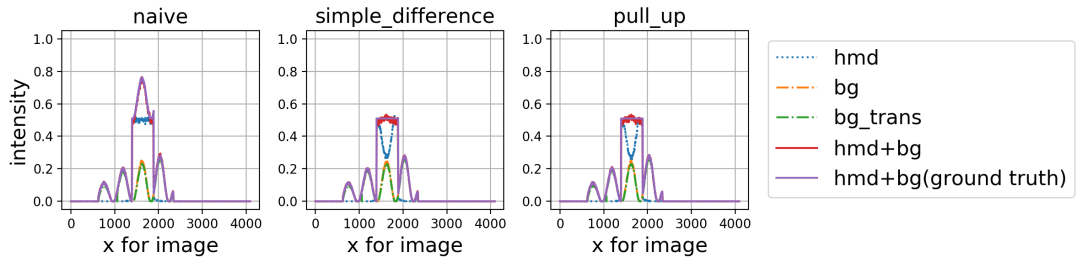
図 6.4: 各提示手法の実行結果 ($\vec{i}_V > \vec{i}_B$: 左側, $\vec{i}_V < \vec{i}_B$: 右側)

適用することで, $\vec{i}_V > \vec{i}_B$ となる場合においては背景の影響を打ち消すことができていることがわかる. 一方 $\vec{i}_V < \vec{i}_B$ となる場合においては, simple difference を用いても背景の波模様が透けて観測されるのに対して, 図 6.4e と図 6.4f を見ると pull up では仮想物体領域の輝度を引き上げることで波模様を打ち消すことができていることがわかる.

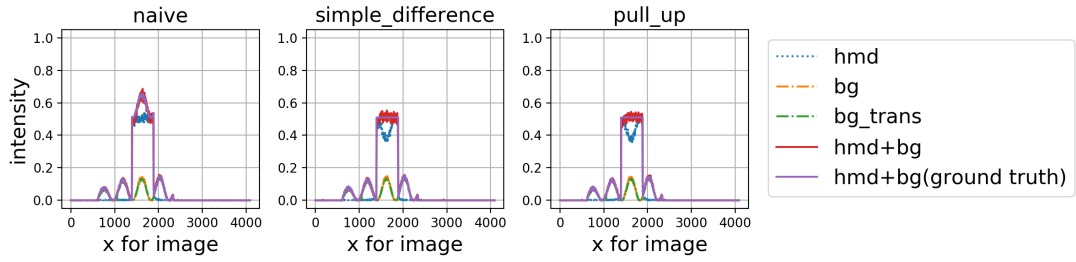
また図 6.5a, 図 6.5b, 図 6.5c に $\vec{i}_V > \vec{i}_B$ となる場合の結果および図 6.4a, 図 6.4c, 図 6.4e を画像中の仮想物体の中央の座標 $y = 1805$ でスライスしたグラフを示す. 一方で, 図 6.6a, 図 6.6b, 図 6.6c に $\vec{i}_V < \vec{i}_B$ となる場合の結果である図 6.4b, 図 6.4d, 図 6.4f を同様にスライスしたグラフを示す. これらの図において, 青色の点線は $\vec{i}_E$ のうち OST-HMD から出力された仮想物体成分であり, 黄色と緑色の破線は $\vec{i}_E$ のうち LCD から出力された背景成分である. ただし黄色の破線は



(a) ch: Red



(b) ch: Green

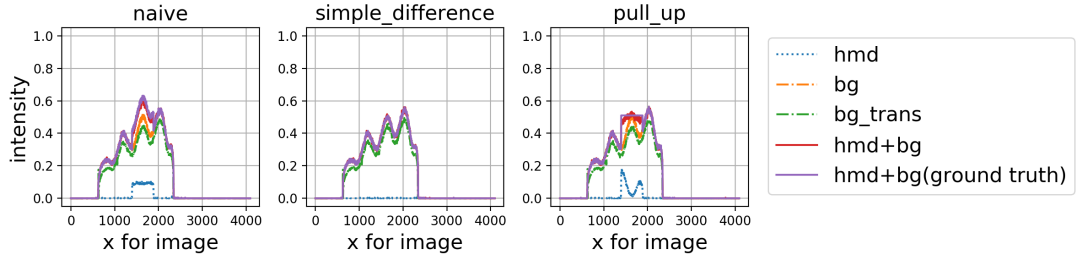


(c) ch: Blue

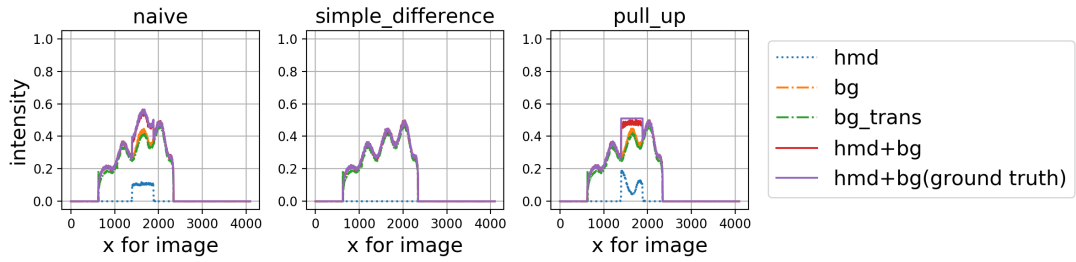
図 6.5: $\vec{i}_E$ をスライスした図, $\vec{i}_V > \vec{i}_B$

Eye-Camera で実際に捉えたものであり，緑色の破線は Scene-Camera からキャリブレーションの結果を用いて変換したものである．また赤色と紫色の実線は背景，仮想物体の双方が出力されている場合の最終的な結果であり $\vec{i}_E$ そのものである．ただし紫色の実線は理想の $\vec{i}_E$ を示しており，黄色の破線で示される Eye-Camera からの値と $\vec{i}_V$ を基に計算した，OST-HMD - Eye-Camera 間と Eye-Camera - Scene-Camera 間のキャリブレーションが正確に行われた場合の値である．

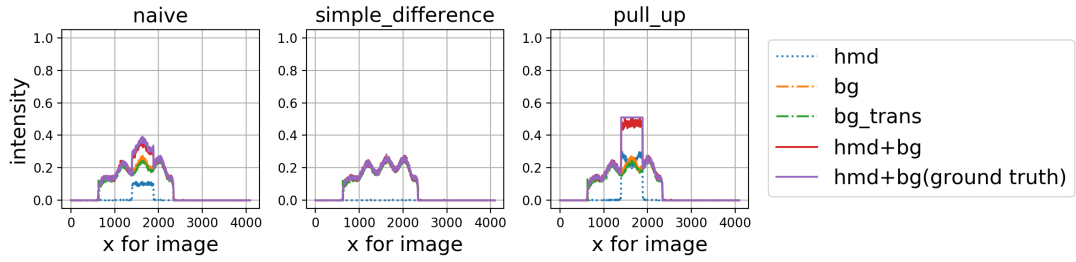
ここで $\vec{i}_V > \vec{i}_B$ の場合の結果である図 6.5a, 図 6.5b, 図 6.5c に着目する．赤色



(a) ch: Red



(b) ch: Green



(c) ch: Blue

図 6.6: $\vec{i}_E$ をスライスした図, $\vec{i}_V < \vec{i}_B$

の実線と紫色の実線を比較すると、多少の誤差はあるものの概形は一致していることがわかる。また提示手法 naive では仮想物体成分と背景成分が足し合わされた形となり、simple difference では背景成分である波模様が消え、pull up では $\vec{i}_V > \vec{i}_B$ であることから simple difference と同様の結果となっている。一方で $\vec{i}_V < \vec{i}_B$ の場合の結果である図 6.6a, 図 6.6b, 図 6.6c に着目する。こちらも同様に赤色の実線と紫色の実線との間に多少の誤差はあるものの、概形は一致していることがわかる。また提示手法 naive では当然仮想物体成分と背景成分が足し合わされた形と

なるが，simple difference では $\vec{i}_V - \vec{i}_B$ が計算値が負の値をとるため，出力値が 0 として扱われ，結果として背景の成分のみが赤色の実線，紫色の実線に表れていることがわかる．また pull up では $\vec{i}_V < \vec{i}_B$ であることから simple difference とは異なり，仮想物体領域において $\vec{i}_V$ にオフセットがついたような結果となっている．これらのことから，意図通りの動作が行われていることがわかる．

また表 6.3 に $\vec{i}_V > \vec{i}_B$ の場合の理想的な輝度値（図 6.5a， 6.5b， 6.5c 中の ground truth）との仮想物体領域における絶対平均誤差を示す．表 6.4 にも同様に $\vec{i}_V < \vec{i}_B$ の場合の仮想物体領域における絶対平均誤差を示す．表 6.3 を見ると，どの手法のどの色チャンネルにおいても誤差がほぼ 0.02 付近でばらつきは比較的少ない．対して表 6.4 を見ると，特に pull up において色チャンネルによる誤差の違いが顕著に現れており，rgb 中の b チャンネルが r チャンネルの 2 倍以上の誤差となっていることがわかる．このため本システムでは $\vec{i}_V, \vec{i}_B$ の値によっては，色チャンネルによって手法が理想とする輝度値を再現する正確さが異なることがあることがわかる．

一方で pull up は背景光の変化成分を打ち消すためにそのオフセットを犠牲にする手法であるがゆえに，simple difference にくらべ OST-HMD に要求する出力が大きくなることがほとんどである．一方で OST-HMD には通常のディスプレイ同

表 6.3: 図 6.5a， 図 6.5b， 図 6.5c の仮想物体領域での各 ch における絶対平均誤差

	Red	Green	Blue
naive	0.02557	0.01798	0.02183
simple difference	0.02246	0.01782	0.02158
pull up	0.02351	0.01810	0.02082

表 6.4: 図 6.6a， 図 6.6b， 図 6.6c の仮想物体領域での各 ch における絶対平均誤差

	Red	Green	Blue
naive	0.02132	0.01028	0.01625
simple difference	0.00630	0.00478	0.00735
pull up	0.01683	0.03131	0.04085

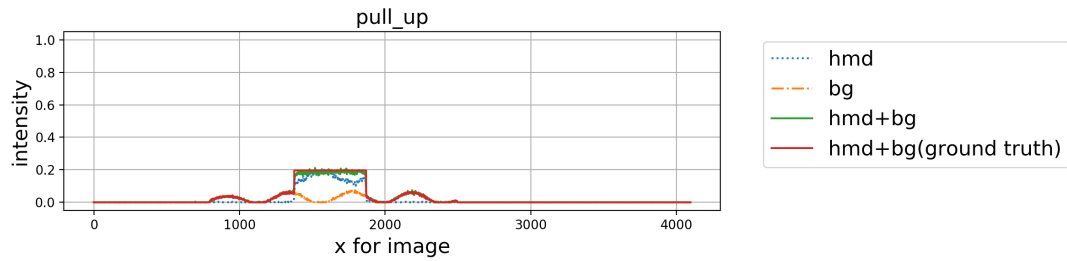


図 6.7: 目標値が OST-HMD の出力限界未満で済む例

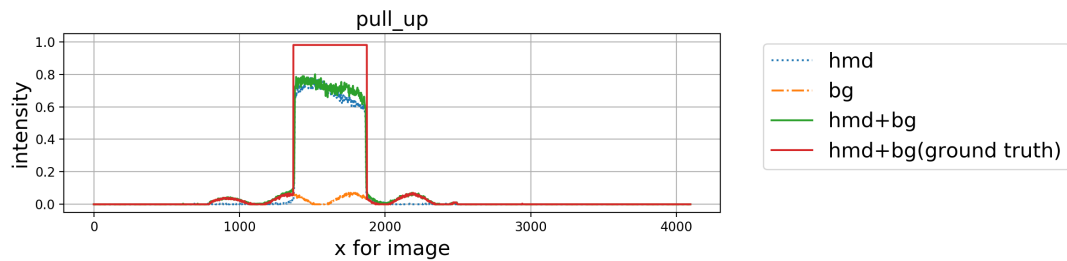


図 6.8: 目標値が OST-HMD の出力限界を超える例

様に出力することができる光量には限界がある．このため，出力する仮想物体が同じでも pull up では simple difference にくらべ多くの背景において OST-HMD の出力限界に達してしまう．図 6.7 と図 6.8 はどちらも pull up を用いて背景の変化成分を打ち消す処理を行った際に Eye-Camera で撮影された画像から rgb の 3 チャンネルのうち b のみ抜き出した上で $y = 1805$ でスライスした図である．特に図 6.7 は赤線で示されている目標値が OST-HMD の出力限界を超えずに，正しく背景の変化成分を打ち消すことができている例であり，図 6.8 は赤線の目標値が青線の OST-HMD の出力限界を超えてしまっているために，正しく背景の変化成分を打ち消すことができていない例である．またこの例では，Scene-Camera で撮影された画像から Eye-Camera で撮影された画像へ変換する際の誤差を排除するために，システムの入力に Eye-Camera で撮影した画像を直接用いた．

6.3 半透明感低減手法の評価

6.3.1 改善手法のパラメータによる仮想物体の視認性調査実験

前節で問題となった q の決め方であるが、これを定めるためには、ある背景画像に対して、仮想物体画像をどのような q の値を用いて提示すると、どれほど仮想物体が目標とする仮想物体画像に近く見えるかを調査する必要があると考える。そこで様々な背景画像 100 枚と仮想物体画像 100 枚を用意した上で、このパラメータ q を 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 と変えて提示した際に Eye-Camera から取得される画像を 17 名の被験者に見せ、提示画像からどれほど背景あるいは目標とする仮想物体に近く見えるかについてアンケート調査を行う。ここでアンケートは図 6.9 に示すように、それぞれの q に関して背景画像 100 枚と仮想物体画像 100 枚のうちから 20 枚ずつ取り出し、それら一枚ずつに一問の質問を記す。つまり 1 つの q に対して 20 問ずつで合計 100 問の質問を作成する。またこのアンケートにおける背景画像はスマートフォンを用いて撮影された屋外 50 枚屋内 50 枚から構成され、それぞれ 0 以上 1 以下の一様分布に従う乱数を画像にかけるスケーリングをした後に LCD から出力した光を Eye-Camera で捉えた画像を指す。一方仮想物体画像は、そのオフセットと、縦方向の sin 波の振幅と周波数、横方向の sin 波の振幅と周波数、回転角度を一様分布の乱数からそれぞれ生成して作成する。また、それぞれの質問に参考として仮想物体の重畳を行っていない背景画像 $i_B(x, y, c)$ と、重畳される仮想物体画像である $i_V(x, y, c)$ を併記した。図 6.10 に質問の一例を示す。

また上記のアンケート結果から背景画像と仮想物体画像がどのような特徴を持つ場合に、目標とする理想画像により近く感じるのかを調査するため、画像の特徴量を定める。本研究にて用いる特徴量は画像をグレイスケール化した上での平均、分散、周波数に関する量の合計 3 種類とする。ここで周波数に関する量は、グレイスケール画像を Fast Fourier Transform (FFT) を用いて周波数領域に変換した後、絶対値をとって振幅スペクトル画像とし、その後画像原点（画素値平均値が格納されている座標）からの距離を用いて重み付けを行った後、画像サイズでの平均値をとった値とした。

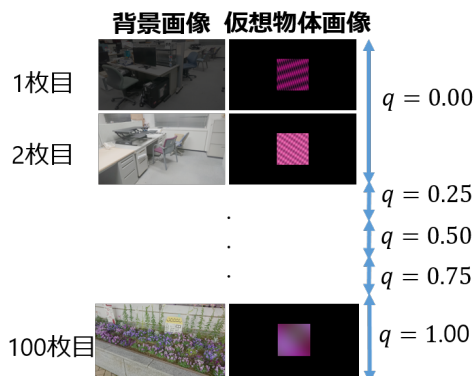


図 6.9: ユーザスタディに用いる画像と q の組み合わせ



図 6.10: アンケートの一例

6.3.2 調査の結果と考察

以上のアンケートを 17 名（男性：15，女性：2，平均年齢 24.9 歳）の被験者に行ってもらい，そのアンケート結果を収集した．ここで，提案手法は q を増加させることで背景の影響（半透明感）が減少するため，主観評価値は増加すると考えられる．一方でオフセットを加えることにより目標とする理想画像とはかけ離れた明るさで提示を行うことになるため，主観評価値が減少すると考えられる．これを確認するために，図 6.11 と図 6.12 には観測画像中の仮想物体が重畳されている領域において， q や理想画像と観測画像との誤差を横軸にとった場合に，観測画像が背景と理想画像のどちらにどれだけ近いかという質問に対する回答である主観類似度の被験者平均を縦軸にとったグラフを示す．

それぞれを細かくみると，図 6.11 には，ある q で提案手法を適用した場合（横軸），主観類似度の被験者平均（縦軸）が示されている．ここで図中の直線はこれらのデータ点を直線フィッティングしたものである．このグラフから，パラメータ q を大きくすることによって，入力した仮想物体（理想画像）により近く感じるようになる傾向にあることがわかる．一方で直線に対するばらつきが大きく，画像の組み合わせによって，この特性が異なる可能性が考えられるため，今後は同じ画像の組み合わせにおいて q のみを変化させた際の主観評価値を得るなどの実験が必要であると考えられる．

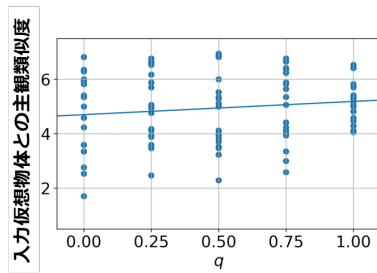


図 6.11: q に対する主観類似度

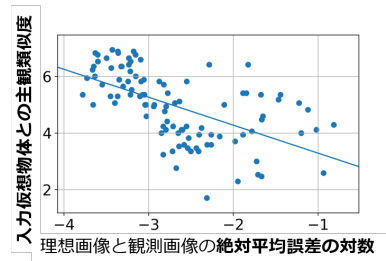


図 6.12: 絶対平均誤差の対数に対する主観類似度

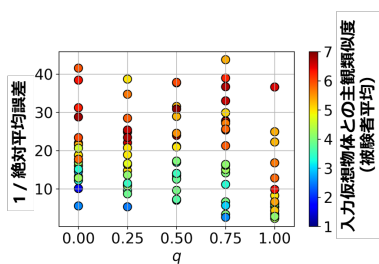


図 6.13: q に対する誤差と主観類似度

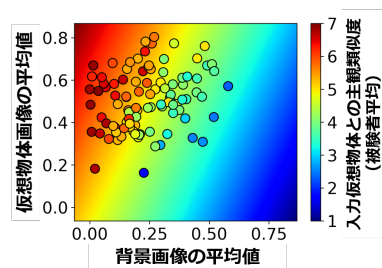


図 6.14: 画像特徴量と主観類似度との関係（平均）

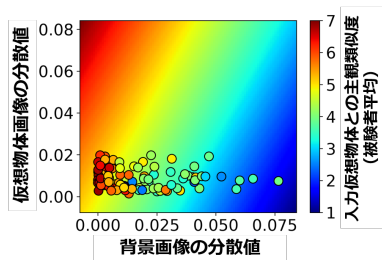


図 6.15: 画像特徴量と主観類似度との関係（分散）

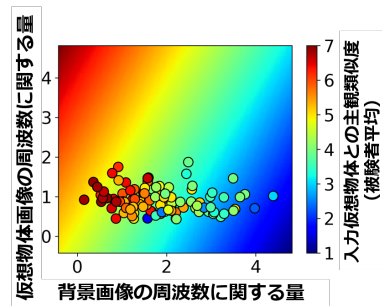


図 6.16: 画像特徴量と主観類似度との関係（周波数）

次に図 6.12 には、理想画像のグレースケール画像と観測画像のグレースケール画像との間の絶対平均誤差（横軸）に対する、主観類似度の被験者平均（縦軸）が示されている。ここで図中の絶対平均誤差は自然対数をとった値を示している。また図中の直線は図 6.11 と同様に、データ点を用いて直線フィッティングしたもの

である。この図から、理想画像と観測画像との誤差が増加するに従って、主観評価値が減少する傾向にあることがわかる。

しかしながら、これらの図からは q と誤差の関係を読み取ることができないため、これらの関係を一つのグラフにまとめて図 6.13 に示す。この図は横軸に q 、縦軸に絶対平均誤差の逆数を置き、また各データ点に主観評価値に応じた色を付与したものである。図の左下のデータ点がある場合、半透明感が大きく、画素値の誤差も大きいことを示している。一方で図の右上にデータ点がある場合、半透明感が小さく、かつ画素値の誤差も小さいことを示している。この図をみると図の左下を中心として、おおよそ扇状に色が変化していることがわかる。このため、このため、本研究における主観類似度は半透明度を示すパラメータである q と明るさに関する画素値との間でトレードオフの関係にあることがわかる。このため、背景画像と仮想物体画像の組み合わせに応じて、このトレードオフを考慮した上で最終的な q を決定することができると考えられる。ただしそのためには、特定の背景画像と仮想物体画像の組み合わせに絞った上で、このトレードオフの関係がどのように変化するかを調査する新たな実験が必要であると考えられる。

また、画像の特徴量が主観類似度にどのような影響を与えているのかを調べるために、今回行った実験で用いた際に Eye-Camera で観測された背景画像の特徴量と、仮想物体画像の特徴量をそれぞれ横軸、縦軸に置き、その画像の組み合わせにおける主観類似度をプロットした図が図 6.14、図 6.14、図 6.14 の 3 つである。またそれぞれの図では実験に用いた画像をグレイスケール化した画像の平均、分散、周波数に関する量といった特徴量に関してプロットを行い、データ点背後の色は、背景画像の平均値を x 軸、仮想物体画像の平均値を y 軸、入力仮想物体との主観類似度を z 軸とする平面にフィッティングをした際の z 軸方向の高さを示している。

いま平均特徴量に関する図 6.14 に着目する。この図を見ると、背景画像の明るさが増加するにともなって主観類似度は減少し、一方で仮想物体画像の明るさが増加するにともなって主観類似度が増加していることがわかる。またこれらの特徴量の増加は互いに逆の影響を主観類似度に与えており、背景画像の明るさを減少させることで主観類似度を増加させることができ、また仮想物体の明るさを増加させることでも主観類似度を同様に増加させられることがわかる。

次に分散特徴量に関する図 6.15 に着目する。こちらも先程の平均値の場合と同

様に仮想物体画像の分散値による主観類似度の変化は比較的小さく、背景画像の分散値からの影響が支配的であることが平面の傾き方向からわかる。しかし、今回得られた仮想物体画像の分散値の値域が背景画像の分散値にくらべ、約 1/4 ほどと比較的狭いため、より分散値の値域が広くなるような追加の実験が求められると考えられる。

最後に周波数に関する特徴量に関する図 6.16 に着目する。こちらも他の特徴量と同様に仮想物体画像の特徴量の主観類似度に対する影響が、背景画像の特徴量にくらべて大きいことが、平面の傾きからわかる。しかしこちらも分散値と同様に仮想物体画像の特徴量の値域が背景画像にくらべて狭いため、さらなる調査が必要と考えられる。ただし、AR の実応用のシーンを考えると、仮想物体画像に背景画像のような山や海のような景色を映した遠景な画像が、単一のオブジェクトを映した近景な画像と同じ頻度で用いられることは考えにくく、議論の必要性を感じる。

これまで平均、分散、周波数に関する量の主観評価値への影響をそれぞれ見てきたが、いずれも主観評価値と無関係ということではなく、影響の大小はあるもののある程度の寄与が存在することがわかった。これらの結果からもっとも観測画像が理想画像に近く感じるような画像の特徴というのは、背景画像をグレースケール化した際の平均値と分散値と周波数に関する量が小さく、かつ仮想物体画像をグレースケール化した際の平均値と分散値と周波数に関する量が大きい場合であることがわかった。しかし、このような理想の特徴量関係を、どのような画像においても満たすということは難しいため、同様の関係においても q の調整によって主観評価値にどの程度影響を与えられるかについて詳細な調査が今後必要であると考えられる。

一方、提案手法の課題と今後の展望として、本手法のように q といった単一のパラメータによって、提示画像のオフセットのみを調整するような手法では人間の知覚をデータから考慮したとしても、そのすべてを十分に反映させることができないと考えにくい。このため、より多くのパラメータでもって、ある仮想物体画像に対するオフセットマップ画像を複数のガウス分布などを用いて生成することで、より主観評価値から得られる人間の知覚に関する情報を提示画像により多く反映させることができるのではないかと考えられる。

第 7 章 まとめ

本研究では Sutherland のプロトタイプから始まった OST-HMD には背景光の特徴によっては OST-HMD が提示する仮想物体が見えにくくなってしまう問題があることについて述べた。この問題に取り組むべく多くの研究によって OST-HMD のハードウェアの改善が脈々と続けられてきたが、現在までに実用化された例は存在しない。このため、本研究ではより短期的な改善策として、ハードウェア構成は従来の基本的な構成のまま、ソフトウェアのみによる改善を図った。その基本的なアイデアである仮想物体画像から背景画像を差し引いた差分を OST-HMD から出力する手法と、HMD が出力可能な範囲を超えた場合に人間の知覚に基づいて可能な限り OST-HMD が出力可能な範囲に抑える方法が Langlotz らによって提案・実装されているが、彼らのユーザスタディによって単純に差分を出力する方法と有意差がないことが示された。そこで本研究では仮想物体画像から背景画像を差し引いた差分に、あるオフセットを加えても人間の知覚には違いが感じられないと考え、その差分に背景画像と仮想物体画像に応じたオフセットを足し上げることで負の光量を出力せずに背景光の影響を取り除いた上で仮想物体を提示する方法を提案した。提案法によって、問題なく背景光の影響を取り除くことが可能なことを示したうえで、このオフセットは背景画像と仮想物体画像の組み合わせによっては差分のみを出力する手法とくらべ、容易に OST-HMD の出力範囲を超えてしまうことから、可能な限りオフセットを妥協する方法としてオフセットにクォンタイルを用いる方法を考案し、様々な特徴をもつ背景画像と仮想物体画像との組み合わせにおいて、どのようなクォンタイル値が適切かを調査するため、アンケート調査を行った。その結果、今回用いた特徴量のすべてにおいて、背景画像の特徴量が小さく、かつ仮想物体の特徴量が大きい場合に主観類似度の値が大きくなる傾向にあることがわかった。しかしながら、様々な特徴量の画像においても、その画像の組おける最大限の主観類似度を目指す場合には、同様の特徴量関係においても q の調整によって主観評価値にどの程度影響を与えられるかについての詳細な調査が今後必要であると考えられる。

謝辞

研究テーマの相談からはじまり，修士論文に至るまで，常日頃から毎週のミーティングにて実験系の構築に関する細かな箇所まで綿密なご教授・ご鞭撻を頂きました加藤博一教授に多大なる感謝の意をここに記します．また本修士論文を執筆するにあたって的確なご指摘を頂いただけではなく，本研究で行う実験計画に関しても多くの議論を交わして頂いた神原誠之准教授に感謝の意を記します．また本研究に必要な機材を提供してくださっただけではなく，実験系の構築や実験の遂行にあたって多くの細かな相談にさえいとわず乗って下さった，藤本雄一郎助教，Alexander Propsi 元助教には厚く御礼申し上げます．また関連研究のあいまいな行間を埋めるアドバイスを下さったり，類似のシステムであるプロジェクタカメラシステムの知見を数多くご教授してくださった秋山涼 Ph.D. には厚く御礼申し上げます．他にも輪講やゼミなどで，的確な指摘を下さった武富貴史客員准教授にも謝意を示します．さらには本研究室の秘書として日々の研究生活を支えて下さったり，オウル大学への留学の際の手続きなどを行って下さった上野真紀子女史，小川暁子女史においても感謝いたします．国をまたいでは，本研究の本筋ではありませんがオウル大学へのインターンにおいて，アウェイな環境にあった私にも全力で研究だけでなく，北欧フィンランドのオウルでの生活に関しても細かくサポートしてくださった Lam Huynh Ph.D. には伝えきれない感謝の念があります．他にも日頃から私の研究生活における心の支えとなってくださった，本研究室の多くの学生，インターン生，研究生たちにも感謝の意を示します．また私の両親においては，私が生まれてから様々な苦勞のなか育児を行い，本研究を完遂するまで影なる応援を常に行って頂いたことには，表す言葉もないほどに感謝しております．

参考文献

- [1] Ivan E. Sutherland: “A head-mounted three dimensional display”, Proceedings of the December 9-11, joint computer conference, part I. ACM, 1968.
- [2] Ivan Sutherland Photo Essay - A.M. Turing Award Winner: “http://amturing.acm.org/photo/sutherland_3467412.cfm”, (2020/01/25 accessed).
- [3] Sony Interactive Entertainment: PlayStationVR, “<https://www.playstation.com/en-us/explore/playstation-vr/>”, (2020/01/14 accessed).
- [4] EPSON: Moverio, “<https://moverio.epson.com>”, (2020/01/14 accessed).
- [5] Microsoft: HoloLens, “<https://www.microsoft.com/en-us/hololens>”, (2020/01/14 accessed).
- [6] HTC: VIVE Pro, “<https://www.vive.com/jp/product/vive-pro/>”, (2020/02/14 accessed).
- [7] Yuta Itoh, Takumi Hamasaki, Maki Sugimoto: “Occlusion leak compensation for optical see-through displays using a single-layer transmissive spatial light modulator”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 23(11), pp. 2463-2473, 2017.
- [8] Kiyoshi Kiyokawa, Yoshinori Kurata, Hiroyuki Ohno: “An optical see-through display for mutual occlusion with a real-time stereovision system”, Computers & Graphics, 25(5), pp. 765–779, 2001.
- [9] Kiyoshi Kiyokawa, Mark Billinghurst, Bruce Campbell, Eric Woods: “Anocclusion-capable optical see-through head mount display for supporting co-located collaboration”, 2nd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Realit, pp. 133, IEEE, 2003.
- [10] Takayuki Uchida, Kosuke Sato, Seiji Inokuchi: “An optical see-through MR display with digital micro-mirror device”, Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, 7(2), 2002.

- [11] Ozan Cakmakci, Yonggang Ha, Jannick P. Rolland: “A compact optical see-through head-worn display with occlusion support”, Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 16-25, 2004.
- [12] Chunyu Gao, Yuxiang Lin, Hong Hua: “Occlusion capable optical see-through head-mounted display using freeform optics”, 2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 281-282, 2012.
- [13] Yuta Yamaguchi, Yasuhiro Takaki: “See-through integral imaging display with background occlusion capability”, Applied optics 55(3), A144-A149, 2016.
- [14] Andrew Maimone, Henry Fuchs: “Computational augmented reality eyeglasses”, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 29-38, 2013.
- [15] Andrew Maimone, Douglas Lanman, Kishore Rathinavel, Kurtis Keller: “Pinlight Displays: Wide Field of View Augmented Reality Eyeglasses using Defocused Point Light Sources”, ACM Transactions on Graphics, pp. 33, 2014.
- [16] 清川清: “拡張現実感 (AR): 9. 展望 1: AR のハードウェア AR 用ヘッドマウントディスプレイ技術の動向と展望”, 情報処理 51(4), pp. 414-418, 2010.
- [17] 清川清: “AR 用ヘッドマウントディスプレイの動向と視覚拡張への応用”, 電子情報通信学会論文誌 C, 102(5), pp. 170-178, 2019.
- [18] Kiyoshi Kiyokawa, Yoshinori Kurata, Hiroyuki Ohno: “An optical see-through display for mutual occlusion of real and virtual environments”, Proceedings IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, 2000.
- [19] Tobias Langlotz, Matthew Cook, Holger Regenbrecht: “Real-time radiometric compensation for optical see-through head-mounted displays”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 22(11), pp. 2385-2394, 2016.
- [20] Yuta Itoh, Tobias Langlotz, Daisuke Iwai, Kiyoshi Kiyokawa, Toshiyuki

- Amano: “Light attenuation display: subtractive see-through near-eye display via spatial color filtering”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 25(5), pp. 1951-1960, 2019.
- [21] 吹上大樹: “視覚特性を利用した複合現実感 (MR) 環境における透明視表現手法”, 東京大学学術機関リポジトリ, 2015.
- [22] Anselm Grundhööfer, Oliver Bimber: “Real-Time Adaptive Radiometric Compensation”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14(1), pp. 97–108, 2008.
- [23] Mahesh Ramasubramanian, Sumanta N. Pattanaik, Donald P. Greenberg: “A perceptually based physical error metric for realistic image synthesis”, *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, p. 73-82, 1999.
- [24] Gregory Ward Larson, Holly Rushmeier, Christine Piatko: "A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes" *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 3(4), pp. 291-306, 1997.
- [25] 立木 秀 樹: グレイコードと実数, “<https://www.i.h.kyoto-u.ac.jp/users/tsuiki/bit/gray.html>”, (2020/01/26 accessed).
- [26] Boris T. Polyak: “Some methods of speeding up the convergence of iteration methods” *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 4(5), pp. 1-17, 1964.
- [27] Diederik Kingma, Jimmy Ba: “Adam: A method for stochastic optimization”, *ArXiv Preprint*, ArXiv:1412.6980, 2014.
- [28] Timothy Dozat: “Incorporating Nesterov Momentum into Adam”, *International Conference on Learning Representations*, workshop paper, 2016.
- [29] 西田友是: “座標変換 (コンピュータグラフィックスの数理 (2))”, *応用数理*, 13(4), pp. 334-342.
- [30] Giovanna Sansoni, Matteo Carocci, Roberto Rodella: “Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors” *Applied optics*, 38(31),

pp. 6565-6573, 1999.

発表リスト