

協調型複合現実空間のための
顔映像重畳による視線情報の復元

システム情報工学研究科

筑波大学

2006年3月

竹村 雅幸

概要

複合現実感 (Mixed Reality:MR) とは、我々が生活する現実世界とコンピュータグラフィックス (Computer Graphics:CG) により表現された仮想世界とを融合した複合現実の空間を、ユーザに体験させる技術である。複数のユーザが同時に複合現実感を共有できる空間を協調型複合現実空間と呼ぶ。協調型複合現実空間では頭部装着型ディスプレイ (Head Mounted Display:HMD) を使用することにより、個々のユーザの視線や眼の表情などが HMD によって隠され、ユーザ間のコミュニケーションが阻害されるという問題が生じる。本研究では、協調型複合現実空間における HMD 利用に起因する視線情報欠落の問題に着目し、視線情報を復元することで、ユーザ間の円滑なコミュニケーションが可能な協調型複合現実空間の実現を目指した。

本論文では、視線情報の復元のために、ユーザの顔映像を合成して HMD に重畳し、仮想的に HMD を消去する方式を提案する。まぶたの動きを含んだ任意視線の顔映像を、2 種類の方法で生成する。1 つ目の手法は 3 方向からの顔画像を利用する簡易な手法であり、2 つ目の手法は 3 次元スキャナを利用して高精細な顔映像を生成する手法である。

視線検出機構により視線情報をリアルタイムで検出し、赤外線 3 次元位置センサでユーザの位置姿勢をリアルタイムで算出する。これらの情報と顔映像生成手法を利用して、まぶたの動きを含んだ視線情報を再現した顔映像を生成し、これを重畳することで視線情報を復元する。二人のユーザ間の視線認知精度を主観評価実験により検証し、提案方式による視線情報復元の有効性を示す。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	研究の位置付けと方針	3
2.1	コミュニケーションにおける視線の重要性	3
2.1.1	コミュニケーションにおける視線の役割	3
	アイコタクト	3
	視覚的共同注意	4
2.1.2	視線の重要性	4
2.2	協調型複合現実空間における円滑なコミュニケーションのために	5
2.2.1	視線情報の伝達を試みた関連研究	5
2.2.2	現実に遜色ない円滑なコミュニケーション	5
2.3	協調型複合現実空間における視線情報の復元	6
2.3.1	顔映像の生成	6
	複数方向からの顔画像を利用した顔映像生成	6
	3次元スキャナを利用した顔映像生成	7
2.3.2	視線の計測	7
2.3.3	頭部位置姿勢の計測	7
2.4	システム構成	7
第3章	3方向からの顔画像を利用した顔映像生成	9
3.1	3次元モデルの算出	9
3.1.1	因子分解法による3次元形状推定	9
3.1.2	特異値分解	11
3.1.3	RとSの決定	11
3.2	展開テクスチャの生成	11
3.2.1	展開手法	12
3.2.2	生成結果	13
3.3	まぶたの動きの再現	13
3.4	視線の再現	14
3.4.1	眼球テクスチャの生成	14
3.4.2	視線移動の再現	15
3.5	顔映像のリアルタイム生成	16

3.6	顔映像生成結果と考察	16
3.6.1	モデリング	17
3.6.2	処理速度	17
3.6.3	問題点	18
第4章	スキャナーを利用した高精細顔映像生成	21
4.1	顔映像生成システム	21
4.2	まぶたの動きの再現	22
4.2.1	入力とする顔モデル	22
4.2.2	モーフィング	23
4.2.3	特徴点再分割	23
4.2.4	パッチ再分割	24
4.2.5	特徴点とパッチの最適配置	26
4.3	視線の再現	28
4.4	実験結果	28
4.4.1	処理の流れ	28
4.4.2	映像生成の結果	30
4.5	まとめと考察	30
第5章	視線検出	33
5.1	視線検出機構	33
5.2	視線再現手法	34
5.2.1	視線映像の生成	34
5.2.2	注視点キャリブレーション	34
5.2.3	注視方向と瞳孔移動量の関係	35
5.3	視線検出結果と考察	36
第6章	顔映像重畳による視線情報の復元	38
6.1	座標系の定義	38
6.2	固定位置関係の座標系	39
6.3	動的に変化する座標系の位置関係	40
6.3.1	3点法	41
6.3.2	12点法	43
	マーカー切り替わり時のぶれ問題	43
	オフセット問題	44
	独立ベクトル不足問題	45
6.3.3	最小二乗法による3次元回転行列の算出方法	46
6.4	3点法と12点法の精度比較	48
6.4.1	シミュレーション方法	49

6.4.2	結果と考察	50
6.5	幾何学的整合性と時間的整合性	50
6.5.1	誤差を考慮した座標変換	50
	座標変換の順序	50
	角度誤差の拡大	53
6.5.2	時間的整合性	54
	時間的不整合が位置ずれに及ぼす影響	54
	本システムにおける時間的整合性	55
6.6	実験	57
6.6.1	実験環境	57
6.6.2	実験結果	58
6.6.3	考察	58
第7章	主観評価実験による有効性の検証	62
7.1	距離変化や提示映像の違いによる影響	62
7.1.1	視線認知実験	62
	実験タスク	62
7.1.2	評価手法	62
7.1.3	両者間の距離	63
7.1.4	マーカー配置	65
7.1.5	実験結果と考察	66
	HMDを装着することによる影響	66
	距離変化にともなう影響	66
	映像提示の違いによる影響	66
7.2	対面時における視線情報復元の有効性の検証	67
7.2.1	視線認知実験	67
7.2.2	評価手法	67
7.2.3	実験結果と考察	67
	(a)HMDなし vs. (b)理想的	68
	(b)理想的 vs. (c)復元	68
7.2.4	マーカー別の正解率の結果と考察	69
7.3	視覚的共同注意の有効性の検証	71
7.3.1	視線認知実験	71
	実験タスク	71
7.3.2	評価手法	72
7.3.3	実験結果と考察	73
	(a)HMDなし vs. (b)理想的	73
	(b)理想的 vs. (c)復元	73
7.3.4	マーカー別の正解率の結果と考察	73

第 8 章	光学的不整合による異和感の解消	77
8.1	光学的不整合がユーザに与える影響	77
8.1.1	光学的不整合がコミュニケーションに与える影響	77
8.1.2	関連研究	79
8.1.3	光学的不整合の許容範囲	79
8.2	色合いに不整合のある顔画像の提示	80
8.2.1	カラーマネージメント	80
	カメラカラーマネージメント	81
	ディスプレイカラーマネージメント	81
8.2.2	均等色空間の利用	81
8.2.3	顔の色合いを変化させた提示画像の生成	83
8.3	光学的不整合の色合いに対する許容範囲	84
8.3.1	自然な顔色	84
	評価実験手法	84
	実験タスク	86
	実験結果	86
	背景色による自然な顔色への影響	88
8.3.2	顔上下部における色差の許容範囲	90
	提示画像の生成	90
	評価実験手法	90
	実験結果	91
8.3.3	同一色差における異和感の比較	93
	評価実験手法	93
	実験結果	93
8.3.4	色差の大きさと異和感の強さ	96
	評価実験手法	96
	実験結果	96
8.3.5	顔の色合いの上下反転による影響	99
	評価実験手法	99
	実験結果	99
8.3.6	まとめ	101
8.4	光学的不整合の陰影に対する許容範囲	102
8.4.1	顔上下部における陰影の不整合の許容範囲	102
	陰影の異なる顔画像の撮影環境	102
	陰影に不整合のある顔画像生成	103
	評価実験手法	104
	実験結果	104
8.5	異和感の解消	105

8.5.1	カラーマッチング	105
	ダイナミックレンジとグレーバランスの補正	107
	色相と彩度の補正	108
8.5.2	カラーマッチング結果と考察	108
第9章	まとめ	111
	謝辞	113
	参考文献	114
	公表論文リスト	119
	付録	122

目次

1.1	HMDによる視線情報の阻害	2
1.2	合成顔映像の重畳による視線情報の復元	2
2.1	アイコンタクト	4
2.2	視覚的共同注意	4
2.3	システム構成	8
3.1	3次元モデル生成	10
3.2	円筒形展開手法	12
3.3	展開手法	13
3.4	展開テクスチャ生成結果	14
3.5	まぶたの動き再現手法	15
3.6	眼球テクスチャ生成手法	16
3.7	視線移動	17
3.8	リアルタイム顔映像生成の流れ	18
3.9	顔映像生成結果	19
3.10	処理の流れ	19
4.1	撮影システム	22
4.2	118個の特徴点	23
4.3	外挿法を含んだ表現	24
4.4	外挿法による上向き視線の再現	24
4.5	内挿法による表現	24
4.6	内挿法による上向き視線の再現	24
4.7	再分割の断面図	25
4.8	近似を利用した高精細モデルでのモーフィング	26
4.9	レンダリングの流れ	26
4.10	パッチ分割手法	27
4.11	パッチ間の隙間問題	27
4.12	最適パッチ分割	28
4.13	再分割による細分化の結果	29
4.14	まぶたの動きを再現した合成顔画像	30

4.15	視線移動とそれに伴うまぶたの動きを再現した合成顔画像	32
5.1	視線検出機構付き HMD	33
5.2	視線検出機構システム図	34
5.3	注視点キャリブレーション	35
5.4	輻輳の再現	36
5.5	眼球画像	37
6.1	システム座標系	40
6.2	座標系の相対的位置関係	41
6.3	マーカー計測可能角度	42
6.4	3点法	42
6.5	ユーザ回転可能範囲	44
6.6	12点の赤外線マーカーを配置した HMD	45
6.7	オフセット補正	46
6.8	計測視野	49
6.9	3点法の誤差 (X 軸 10 [mm] ~ 1000 [mm], Y 軸 100 [mm])	50
6.10	12点法の誤差	51
6.11	誤差の伝播	52
6.12	角度誤差 (理論値)	53
6.13	角度誤差 (誤差あり)	53
6.14	時間差による位置ずれ	54
6.15	実験環境	57
6.16	システム構成	58
6.17	協調型複合現実空間における視線情報の復元	60
6.18	高精細顔映像の重畳による視線情報の復元	61
7.1	評価実験環境	63
7.2	評価実験風景	64
7.3	マーカー配置	64
7.4	実験に利用したビデオスルー HMD	64
7.5	HMD への提示映像の違い	64
7.6	共同作業中の距離	65
7.7	短距離 (左), 長距離 (右) の視線認知精度	65
7.8	視線認知実験を行う 3 条件	68
7.9	視線認知精度	69
7.10	マーカー別の正解率	70
7.11	評価実験環境: 上	71
7.12	評価実験環境: 横	72
7.13	評価実験風景	72

7.14	視覚的共同注意の精度	74
7.15	マーカー別視覚的共同注意の精度 (HMD 非装着時)	75
7.16	マーカー別視覚的共同注意の精度 (HMD 装着時)	75
7.17	マーカー別視覚的共同注意の精度 (視線復元時)	75
7.18	マーカー別視覚的共同注意の精度 (HMD 非装着時)	76
7.19	マーカー別視覚的共同注意の精度 (HMD 装着時)	76
7.20	マーカー別視覚的共同注意の精度 (視線復元時)	76
8.1	光学的不整合による異和感	78
8.2	光学的不整合	78
8.3	色のずれ	80
8.4	カラーマネージメント	81
8.5	Lab 色空間	83
8.6	Lab 表色系と LCh 表色系における肌の色	83
8.7	JIS 規格の高精細カラーデジタル標準画像	83
8.8	LCh 表色系における顔色の許容範囲を調査するための提示画像例	85
8.9	顔色の許容範囲を調査するための提示画像例	85
8.10	主観評価実験の環境	86
8.11	顔色変化グラフと提示画像例	87
8.12	自然だと許容できる顔色の範囲 (背景：灰色)	87
8.13	顔色の許容範囲を調査するための提示画像例 (背景：緑)	88
8.14	顔色変化グラフと提示画像例 (背景：緑)	89
8.15	自然だと許容できる顔色の範囲 (背景：緑)	89
8.16	顔の上下の色合いの異なり	90
8.17	提示顔画像例	91
8.18	マスクを利用した色合いの異なる顔画像例	92
8.19	色合いの変化に対する主観評価	92
8.20	提示画像の色合い	93
8.21	異和感の強さを示す 7 段階の評価尺度	94
8.22	同一色差における異和感を比較するための提示画像	94
8.23	同一色差における異和感の比較	95
8.24	提示画像の色合い	96
8.25	色差の変化に対する異和感の強さを調査するための提示画像	97
8.26	色差の大きさと異和感の強さ	98
8.27	提示画像の色合い	99
8.28	顔の色合いの上下反転の影響を調査するための提示画像	100
8.29	顔の色合いの上下反転による異和感への影響	100
8.30	陰影の異なる顔画像の撮影環境と照明環境	102
8.31	陰影に不整合のある顔画像生成法	103

8.32	提示画像例	103
8.33	評価方法	104
8.34	陰影の異なる顔画像の撮影環境	104
8.35	カラーマッチング	106
8.36	トーンカーブ	106
8.37	マクベスカラーチャート	107
8.38	色相環上での色分布	107
8.39	カラーマッチング結果	108
8.40	カラーマッチング前後における顔画像の理想的条件における重畳	109
8.41	カラーマッチング後の視線情報の復元	110

第1章 はじめに

複合現実感 (Mixed Reality:MR) とは、我々が生活する現実世界とコンピュータグラフィックス (Computer Graphics:CG) により表現された仮想世界とを融合した複合現実の空間を、ユーザに体験させる技術である [1]。複合現実感とは、初期には一人のユーザが体験するシステムに留まっていた。しかしながら近年のコンピュータグラフィックス技術やセンサ機器の発達により、複数のユーザが同時に複合現実空間を共有しながら共同作業を行うシステムの構築が注目されている。本研究では、複数のユーザが同時に複合現実感を共有できる空間を協調型複合現実空間と呼ぶ。

協調型複合現実空間を実現した例として、頭部装着型ディスプレイ (Head Mounted Display:HMD) を通じて対戦相手や味方を視認できるシューティング型アトラクションである AquaGauntlet[2] や BLADESHIPS [55]、複数のユーザが同時に 3次元ディスプレイ上の仮想物体を共有できる Occlusion Shadows[3] などがある。また、現実世界にある 3次元物体をスクリーンとして、プロジェクタで投影を行う「スクリーン物体への光学パターン投影法」[4] も、協調型複合現実空間の生成法として有効と考えられる。これらはいずれも仮想世界を現実世界の上に重畳提示して複合現実空間を生成しているが、重畳提示する方式が異なる。Occlusion Shadows や「スクリーン物体への光学パターン投影法」のような手法は、ユーザが HMD を装着するという煩わしさがなく、ディスプレイ上の非常に狭い空間やプロジェクタの投光範囲でしか仮想世界の重畳提示ができない。一方、HMD を利用する場合には、頭を動かせば見回しが可能なので視界の制限が比較的小さく、目の前に広がる現実世界につなぎ目なく仮想世界を融合することができる利点を持つ。頭部に装着する煩わしさはあるが、没入感や応用範囲の点で他の手段の追従を許さない優れた提示方式であると考えられる。本研究は、HMD の利用を前提として、その欠点を補うことを狙ったものである。HMD を利用した協調型複合現実空間としては複数人参加型のエンターテインメントとして AquaGauntlet[2] や BLADESHIPS [55] が実現されてきたが、今後は、共同作業空間として更なる発展が期待される。

共同作業において相手の表情や視線方向を知覚することは、相手の心理状況や次に起こす行動を、早く正確に推測することを可能にする。視線や表情といった非言語情報は、コミュニケーションにおいて非常に重要な情報を含んでいるといえる。しかし、協調型複合現実空間では HMD を使用することにより、図 1.1 に示すように、個々のユーザの視線や眼の表情などが HMD によって隠され、ユーザ間のコミュニケーションが阻害されるという問題が生じる。協調型複合現実空間における HMD 利用に起因する視線情報欠落の問題に着目し、視線情報を復元することで、ユーザ間の円滑なコミュニケーションが可能な協調型複合現実空間の実現を目指した。

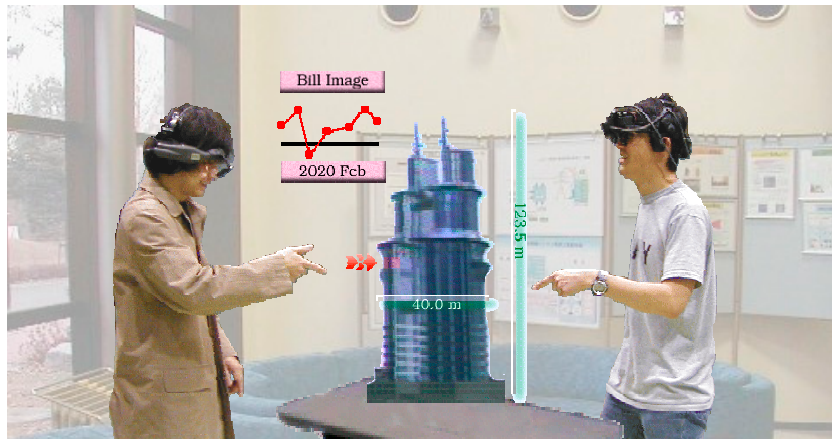


図 1.1: HMD による視線情報の阻害

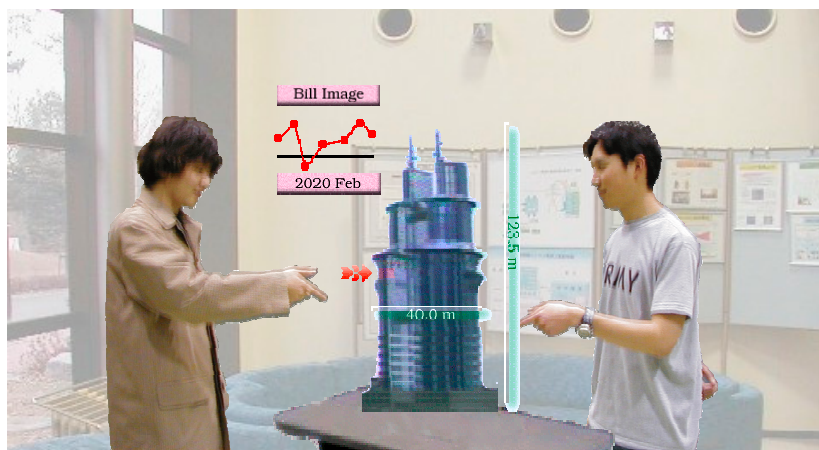


図 1.2: 合成顔映像の重畳による視線情報の復元

本研究では、視線情報の復元のために、ユーザの顔映像を合成して HMD に重畳し、図 1.2 に示すように仮想的に HMD を消去する方式を提案する。提案方式を実現した実験システムを構築するとともに、ユーザ間の視線認知精度を主観評価実験により検証し、提案方式による視線情報復元の有効性を示す。

第2章 研究の位置付けと方針

2.1 コミュニケーションにおける視線の重要性

2.1.1 コミュニケーションにおける視線の役割

共同作業や対話における，身振り，手振り，視線などの非言語情報の有効性については従来から研究されており，その有効性については一般的にも認知されている．非言語情報の中でも視線情報に関する研究はさまざま行われており，視線情報には以下に示すような重要な機能があるとされている．

- アイコンタクト
- 視覚的共同注意

まず，1つめは，アイコンタクトによるコミュニケーションの調節機能である．アイコンタクトとは，図 2.1 に示すように，視線の一致状態と回避状態における被視感の差異によるコミュニケーションの調節機能である．2つめは，他者が注視する物体を認知する視覚的共同注意による意図の伝達機能である [5]．視覚的共同注意とは，図 2.2 に示すように，他者が注視する物体を相手の視線を追従し認知する機能である．相手の注視している物体を推定し認知することは，相手の興味対象や心理状況を読むことを可能とし，コミュニケーションが円滑になるための重要な要素の1つであると考えられる．

視線には，これらの2つの重要な機能があると考えられている．以下にその機能の詳細や重要性について記す．

アイコンタクト

対話時におけるアイコンタクトが持つ重要なコミュニケーション機能に関しては，従来よりさまざまな研究がなされてきた．Kendon[6]やArgyleら[7]の調査では対話時におけるアイコンタクトが持つ重要な機能には以下に示す3つの機能があると示している．

Information Seeking: 相手の反応から迅速にフィードバックを得る機能

Signaling: その会話の内容を好むかどうか相手に伝える無言の表出機能

Controlling the Synchronizing Speech: 対話中に発話するタイミングを調整する機能

また，Cookら[8]は，上記3つの機能以外にも視線には，感情，情動，気分，個性といった感性的情報の伝達機能があることを明らかにしている．このようにアイコンタクトにはさ

コミュニケーションの調節

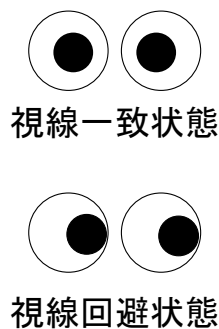


図 2.1: アイコンタクト

他者が注視する物体の認知

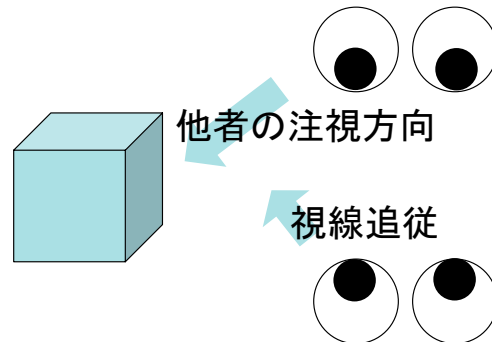


図 2.2: 視覚的共同注意

まざまな機能があり、人は無意識のうちにこれらの機能を利用することで、円滑にコミュニケーションをとりながら対話を行っていると考えられる。

視覚的共同注意

Baron-Cohen[9]は、自閉症の研究を進める過程において、視覚的共同注意が意図の理解に重要であることを示し、視覚的共同注意を利用した意図理解モデルを提案した。彼の意図理解モデルでは、視覚的共同注意による意図の伝達や表情からの心理状態の推定によって、視線の先にある興味対象を検出することができるとしている。他人の興味を中心と、視線の先にある物体を結合し、人の意図を読むことができると主張した。そして、自閉症の人が他人の視線からその人の意図を推定することが困難であるのは、このようなモデルがうまく働かないためであるとした。このような研究報告からも、視覚的共同注意の存在はコミュニケーションを取る相手の心理状況や興味対象の理解を助ける1つの要因であり、円滑なコミュニケーションには重要であることが確認できる。

2.1.2 視線の重要性

ホワイトボードを用いた設計会議などでは横向のユーザの顔を見ることとなり、相手の視線が見づらく、視線情報を利用した円滑なコミュニケーションが取りづらいという問題があった。石井ら [10]は相手の視線を読むことは、相手がどこに興味をもち、集中しているかがわかるためコミュニケーションの中で活用できるということが非常に重要だと考えた。そこで石井らは、リアルタイムビデオ通信を使い遠隔地にいる二人が、協同でホワイトボードに描きながら、なおかつビデオ会議ができる ClearBoard[10]というシステムを構築した。ガラス板を通して相手の顔を見ながら、同時にその表面に絵を描き、更に話をする事ができるシステムであり、視線情報の利用をサポートしたコミュニケーションの重要性が伺える。また、

対面対話とビデオ対話における視線認知特性の違いについて調査した森川 [11][12] は、ビデオ対話においても相手との話し易さや円滑なコミュニケーションにはアイコンタクトが重要であることを示した。

清川らは協調型複合現実空間における視線情報の欠落は視覚的共同注意による意図の伝達を阻害し、共同作業しづらくなることを検証した [13]。これらの研究から、協調型複合現実空間における視線情報の欠落は、対話時におけるコミュニケーションの調節機能を無効にし、共同作業時における視覚的共同注意による意図の伝達を阻害すると考えられる。

2.2 協調型複合現実空間における円滑なコミュニケーションのために

2.2.1 視線情報の伝達を試みた関連研究

清川らは HMD 装着時の頭部方向を視線方向とみなした仮想ベクトルにより視線方向を表現することで、視覚的共同注意による意図の伝達を支援し、共同作業における作業効率が改善することも示した [14]。しかしながら、仮想ベクトル表示によって視覚的共同注意は表現されているものの、視線方向を頭部方向で近似するなど現実世界での意図の伝達と比較すると明かに有効性が低いと思われる。

里らは、頭部方向と指示方向にある物体を注目対象とし検出し、協調型複合現実空間において強調提示することによる円滑なコミュニケーションの実現を目指している。しかしながら、指示方向というトリガーが必要であり、また視線方向を頭部方向で近似しているため、その有効性は低いと思われる。

また、宮里 [15] は、HMD に外向きの小型ディスプレイを取り付け、装着者の眼球の映像を提示することで、視線情報の再現を試みた。しかし、実験システムは、あらかじめ撮影した眼球映像を提示するもので、視線情報をリアルタイムに再現するものではなかった。また、視線情報を提示するディスプレイは小型のため、眼球以外の HMD 領域はむき出しのままである。このような仮想ベクトル表示や、外向きディスプレイへの眼球映像提示は、視線情報の伝達という目的からは有効な手法の一つであると考えられる。

しかし、円滑なコミュニケーションの実現を目指した場合、このように現実世界と乖離した視線提示法では、相手に違和感を与えるとともに、相手から見られているという被視感の再現への有効性も疑問である。また、人間には視線情報を素早く正確に知覚する特別な神経機構が備わっていることを示唆する研究報告 [16][17] もあり、現実と乖離した仮想ベクトル表示などを利用した場合には、このような特別な神経機構が機能しないことも予想される。

2.2.2 現実に遜色ない円滑なコミュニケーション

さまざまな関連研究から、コミュニケーションにおける視線の重要性が伺える。しかし、従来研究では視線方向の伝達のみを重視し、異和感や被視感を考慮したような研究が行われていない。現実と乖離した視線情報の提示手法では、認知速度や、被視感の再現には有効性に

疑問が残るだけでなく、その見慣れない視線情報の提示が違和感を与えることも予想される。複合現実空間における円滑なコミュニケーション実現のためには、違和感の軽減や被視感の再現を考慮した研究は行われていない。現実空間と遜色ない円滑なコミュニケーションを実現するためには、より現実に近い感覚でのコミュニケーションが重要であると考え。より現実に近い感覚のコミュニケーションであれば、異和感を感じることも少く、より使い易いコミュニケーションの道具になることが可能であると考え。本研究では、現実空間と同等の円滑なコミュニケーションを実現するためには、複合現実空間においても現実空間と同様の視線情報提示を再現することが有効であると考え。

2.3 協調型複合現実空間における視線情報の復元

本研究では、協調型複合現実空間において HMD 装着によって失われた視線情報を、ありのままに復元することを目指す。現実をありのままに復元することで、被視感を感じ、違和感を感じることなく、円滑なコミュニケーションが実現できると考える。これにより、協調型複合現実空間の特徴である、CG によって表現された仮想物体を現実空間中に重畳しながら、現実空間と同じように視線を共有した円滑なコミュニケーションができると考える。本研究では、視線情報を再現した写実的な顔映像を HMD 領域に重畳することで、HMD 装着によって失われる視線情報の復元を試みた。以下に、提案した視線情報の復元を実現するために必要な主要な要素技術を示す。

2.3.1 顔映像の生成

異和感なく視線情報を提示し、被視感をも再現するには、写実的な顔映像生成が必要である。本研究では、グラフィックプロセッサ (Graphical Processing Unit:GPU) を活用することでより高速なレンダリングを可能とした写実的な顔映像生成手法 2 種類を開発した。以下に、それぞれの特徴について簡単にまとめる。

複数方向からの顔画像を利用した顔映像生成

異和感なく視線情報を提示し、被視感をも再現するには、写実的な顔映像生成が必要である。ユーザの顔をあらかじめ撮影した複数枚の顔画像を入力として、Image-Based Rendering (IBR) を利用することで肌の質感、表情などを自然に再現する顔画像生成手法がある [18][19][20]。この手法は物体の 3 次元形状を復元する必要がなく、計算コストが低いことも特徴の一つである。しかし、グラフィックス技術の発展に伴い、3 次元モデルについては GPU によるレンダリングがますます高速化している。このため、CPU のみに負荷がかかる IBR の方が、高速なレンダリングには向いていないと考えられる。

ユーザの顔をあらかじめ撮影した複数枚の顔画像から顔形状を復元し、これに獲得した顔テクスチャをマッピングする新たな手法を開発した [57][58][59]。この手法は、顔画像からの

テクスチャを利用することで肌の質感，表情などを自然に再現できる上に，GPU を利用して 3 次元顔形状のレンダリングを行うため高速なレンダリングが可能となる．また，特殊な機材を必要としない簡易な撮影システムであるだけでなく，キャリブレーションしていないカメラで撮影された画像からでも 3 次元顔形状が復元可能であり手軽な顔映像生成手法といえる．

3 次元スキャナを利用した顔映像生成

上記手法では顔写真から撮影したテクスチャを利用することで，肌の質感や表情などをリアルに再現することに成功している．しかし，弱中心射影を仮定するために生じる顔形状の歪みのため高精細化を図ることは難しかった．また，上記手法で再現した顔映像を利用して視線情報の復元を行った場合，顔形状の歪みが視線認知精度に悪影響を及ぼしていることが明らかになった [60]．このため本研究では，3 次元スキャナを利用することで高精細化を，更に高解像度デジタルカメラを利用することで高解像度化を図った [61][62]．再分割を利用することで異なる表情の高精細顔形状間をモーフィングすることに成功し，まぶたの動きを再現することに成功した．高解像度デジタルカメラによってテクスチャを撮影することで，よりリアルな肌の質感，表情を自然に再現することができた．

2.3.2 視線の計測

ユーザの視線情報は，光学シースルー HMD に取り付けられた視線検出機構 (ISCAN System 4000/C) で実時間計測する．視線検出機構の主な仕様は，付録の表 9.2 に示す．

2.3.3 頭部位置姿勢の計測

視線を復元した顔映像を，相手の HMD 領域に重ね合わせるためには位置合わせが必要となる．複合現実感技術における位置合わせには，ARToolkit[21] のような特定形状の画像指標を利用する手法や磁気センサを利用する手法などが挙げられる．画像指標を利用した手法は，画像上での位置ずれが小さい，機材が安価であるなどの長所もあるが，画像中の指標を扱うために，光源環境の変動による安定性の欠如といった短所が存在する．磁気センサは隠れによる計測不能領域が生じないなどの長所を持つが，視線を復元するために顔映像を重畳する本研究の目的には，磁気センサ単体では精度不足である [22][23]．本研究では，現実と仮想の位置合わせの良否による影響を避け，提案手法の有効性を正確に評価するため，精度の高い赤外線 3 次元位置センサ (OPTOTRAK 3020) を利用する．

2.4 システム構成

概要を図 2.3 に示す．HMD に取り付けられた赤外線マーカーによりユーザ頭部の位置姿勢を計測する．HMD に取り付けられた視線検出機構により視線情報を計測する．計測したユーザ頭部の



図 2.3: システム構成

位置姿勢と視線情報を利用し，視線情報復元のための顔映像を生成し，これを相手ユーザの HMD 領域に重ね合わせて表示することで仮想的に HMD を除去する．ただし，研究機材の都合上，被重畳者は視線検出機構の付いた光学シースルー HMD を装着し，観察者は視線検出機構が付いていないビデオシースルー HMD を装着するかたちで実験を行った．

第3章 3方向からの顔画像を利用した顔映像生成

本章では、3方向からの顔画像を入力画像とした視線や眼の表情を持った顔映像生成手法について記す。

3.1 3次元モデルの算出

本手法では、特徴点の対応のとれた3方向からの顔画像を用い因子分解法を行うことで顔の3次元モデルを算出する [24]。この手法はキャリブレーションを行っていない撮影環境の画像からでも3枚の顔画像があれば3次元モデルを算出することが可能であり、手軽に行える3次元モデル算出手法といえる。

この手法では、図 3.1 に示すように、顔画像の2次元の特徴点を用い、回転行列と顔の3次元形状をそれぞれ算出することで顔の3次元モデルを獲得する。まず、各入力顔画像の全特徴点の重心を原点として平行移動成分を除く。3枚の画像中の全特徴点の座標値を観測行列 W とする。この W をカメラと顔の相対的な姿勢を表す R と物体の3次元モデルを表す S に特異値分解することで物体の3次元モデルの生成を行う。

$$W = RS \quad (3.1)$$

3.1.1 因子分解法による3次元形状推定

複数枚の入力顔画像からの3次元形状推定手法について記す。 f 枚の画像で n 個の特徴点に対応できている物とし、 j 番目の特徴点の3次元モデル上の座標を (S_{xj}, S_{yj}, S_{zj}) とする(ただし、 $f \geq 3, n \geq 3$)。この特徴点の i 番目の画像上での2次元座標 (X_{ij}, Y_{ij}) は、正射影モデルを仮定すれば回転行列 $[r_{xi}, r_{yi}]$ を用いて次式のように行列演算で求めることができる。

ここで、

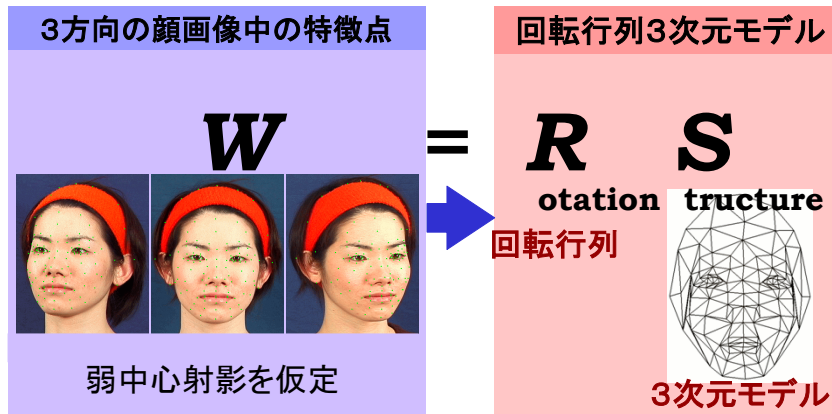


図 3.1: 3次元モデル生成

$$W = \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{f1} & X_{f2} & \dots & X_{fn} \\ Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{f1} & Y_{f2} & \dots & Y_{fn} \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{x1}^T \\ \mathbf{r}_{x2}^T \\ \vdots \\ \mathbf{r}_{xf}^T \\ \mathbf{r}_{y1}^T \\ \mathbf{r}_{y2}^T \\ \vdots \\ \mathbf{r}_{yf}^T \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} S_{x1} & S_{x2} & \dots & S_{xn} \\ S_{y1} & S_{y2} & \dots & S_{yn} \\ S_{z1} & S_{z2} & \dots & S_{zn} \end{bmatrix}$$

である。ただし，画像 i の点 j の座標 (X_{ij}, Y_{ij}) は画像 i の特徴点の重心を原点とした座標系の座標である。

3.1.2 特異値分解

並行移動成分を含まない観測行列 W は，特異値分解により以下のような 3 つの行列の積に分解できる．

$$W = U\Sigma V^T \quad (3.2)$$

ここで，行列 U は $2f \times 3$ ， V は 3×3 の直交行列である．また行列 Σ は対角行列であり，対角要素は

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \quad (3.3)$$

となっている．しかし，行列 W は $2f \times 3$ の行列 R と $3 \times n$ の行列 S の積であるので，階数は 3 である．したがって， σ_4 以下の対角要素は W の誤差により生じたものである．そこで， Σ から $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ だけを取り出した 3×3 の対角行列 Σ' と， U から第 1~3 列を取り出した $2f \times 3$ の行列 U' と， V^T から第 1~3 行を取り出した $3 \times n$ の行列 V'^T を作成すると，

$$W' = U'\Sigma'V'^T \quad (3.4)$$

のように誤差を除いた分解が可能となる．

3.1.3 R と S の決定

R は物体の回転行列であるから，各行ベクトルは

$$|\mathbf{r}_{xj}| = |\mathbf{r}_{yj}| = 1 \quad (3.5)$$

$$\mathbf{r}_{xj} \cdot \mathbf{r}_{yj} = 0 \quad (3.6)$$

となる．これを満たすような適切な行列 A を求めることで

$$R = U'A \quad (3.7)$$

$$S = A^{-1}\Sigma'V'^T \quad (3.8)$$

として回転行列 R と 3 次元座標 S に分解することができる．

上記手法を用いて，特徴点の対応のとれた 3 方向の顔画像から 3 次元モデルを算出した結果を図 3.1 右に示す．

3.2 展開テクスチャの生成

リアルタイムで顔映像を生成する際のレンダリング処理に必要な計算コストを削減するため，3 枚の入力顔画像からテクスチャの画質が劣化しないようにあらかじめ展開テクスチャの生成を行う．展開テクスチャを生成する上で重要となる点は，大きく分けて以下の二つである [25]．

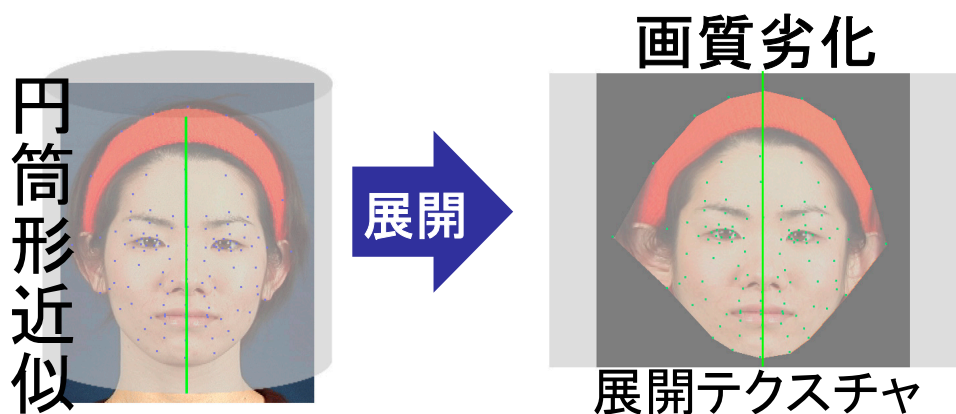


図 3.2: 円筒形展開手法

- パッチ間の連結性を保つ
- パッチ面積を減少させない(画質劣化を抑える)

一般的なテクスチャの展開手法としては、図 3.2 に示すような、対象物体である顔を円筒形に見立てて展開する手法がある。この手法はテクスチャをレンディングした結果が、なめらかであるかどうか視覚的に確認できる点では優れている。しかし、円筒での近似が難しい領域、例えば鼻の側面などでは、展開したパッチ面積が減少しテクスチャの画質が劣化してしまう。本研究では、パッチ間の連結性を保ちつつ、入力画像の画質を損なわない展開テクスチャの生成を考案した。

3.2.1 展開手法

展開手法は、地球を平面に展開する地図投影法の一つである正距方位図法と類似している。正距方位図法は、地図の中心からの方位と距離を正しく表現する手法である。本手法はこれを顔に応用し、鼻の頭の特徴点を中心特徴点として、これを中心に展開する。中心特徴点から他特徴点の角度はそのまま保存する。中心特徴点と他特徴点との距離の代わりに図 3.3 に示すような 3 次元モデル表面上の道のりを利用して展開する。全特徴点に対し中心特徴点からの道のりと角度を求め、展開テクスチャの特徴点位置を決定する。道のりを利用することで、円筒形モデルでの展開や地図の展開手法とは異なり、3 次元形状に存在する凹凸を反映して、パッチ面積の減少によるテクスチャの劣化を抑制した展開が可能となる。求められた特徴点位置を基準に、入力画像のテクスチャを重み付きでレンディングする。3 次元顔モデルの法線方向とテクスチャ撮影用のカメラ位置姿勢を考慮し、パッチ毎に重みを変化させてレンディングを行う。法線方向とカメラの位置姿勢から、パッチが最も高画質に撮影された入力画像を知ることが出来るため、その入力画像の重みを高くしたレンディングを行う。ただ

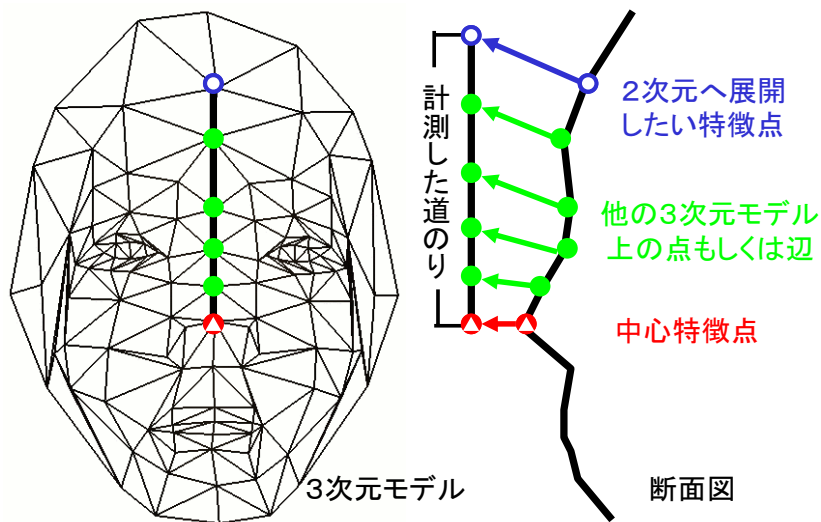


図 3.3: 展開手法

し、パッチ間の連続性を保つために、隣り合うパッチ間でブレンドの割合が著しく変化しないような重み付けとする。

3.2.2 生成結果

生成した展開テクスチャを図 3.4 に示す。展開テクスチャ中央の線は、図 3.3 に示す中心特徴点から 2 次元へ展開した一つの特徴点の道のりとその角度を示す一例である。この手法では、正距方位図法と同様に、中心から遠くなるほど円周方向に拡大されることになるが、拡大によってテクスチャが劣化することはないので、生成画像の画質には影響しない。本手法ではパッチ面積の減少を防止した展開を行うことで、円筒形の手法で見られるようなパッチ面積の減少による画質劣化を抑えることを可能とした。

3.3 まぶたの動きの再現

まぶたの動きは比較的単純な動きであるが、それに伴うテクスチャの変化は複雑であり、眼を開いた状態の画像だけを用いてまぶたの動きに合わせた自然な顔画像を再現することは難しい。本研究では、図 3.5 に示すように眼を開いた顔画像と眼を閉じた顔画像それぞれから生成された 3 次元モデルを内挿することで半眼状態の 3 次元モデルを算出する。この 3 つの状態(眼を開いた、半眼、眼を閉じた)のモデルからそれぞれ展開テクスチャの 2 次元座標位置を算出する。展開した特徴点の 2 次元座標位置を基準に、3 方向の画像からテクスチャブレンドを行う。眼を開いた展開テクスチャには、眼を開いた 3 方向からの顔画像を利用し、眼を閉じた展開テクスチャには、眼を閉じた 3 方向からの顔画像を利用する。半眼の展開テ

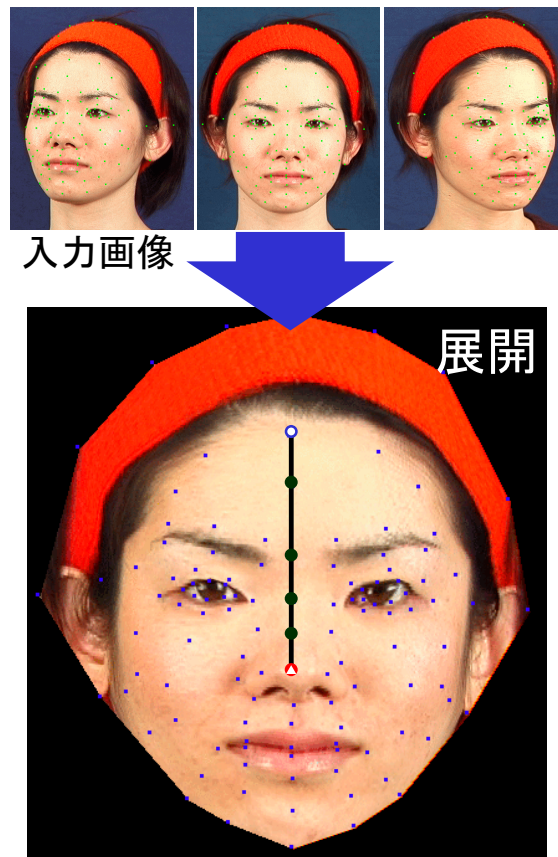


図 3.4: 展開テクスチャ生成結果

クスチャについては，それぞれの顔画像からブレンディングを行うものとする．これをレンダリングの際に，生成したいまぶたの形状に併せて3つの展開テクスチャを使い分けることで，まぶたの動きの再現を行っている．

3.4 視線の再現

実際の人間の視線移動は，眼球の3次元回転運動によるものであるが，本研究では2次元の眼球テクスチャを用い，これを平行移動させることで任意視線の再現を行う．

3.4.1 眼球テクスチャの生成

図 3.6 に示すような異なる4つの視線方向(正面，上，左，右)の正面顔画像を入力画像として用いる．この顔画像の特徴点位置から眼球部分を抽出する．正面顔の正面視線の黒目を基準位置として他の視線の眼球部分を重ね合わせることで眼球テクスチャを生成する．この

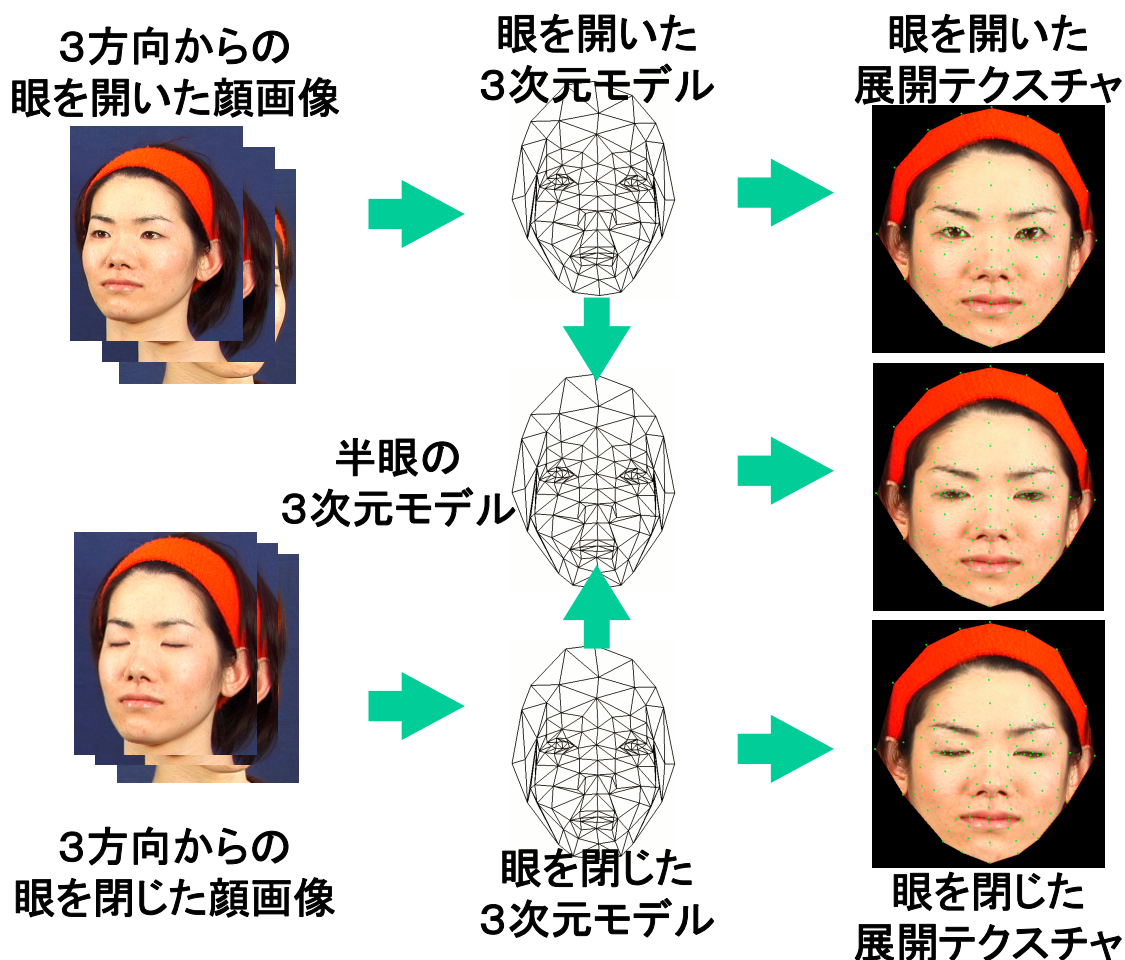


図 3.5: まぶたの動き再現手法

生成された眼球テクスチャを図 3.6 下に示す。

3.4.2 視線移動の再現

図 3.7 左の眼球テクスチャの線で囲まれた領域を使用して，同図右の合成顔画像の眼球部分の合成を行う。図 3.7 左上に示すパッチの位置が眼球テクスチャの基準特徴点位置になる。この基準特徴点位置の眼球テクスチャを利用して，合成顔画像の眼球部分に上書きを行い正面視線の再現を行った結果を図 3.7 の右上に示す。図 3.7 右下に示すような左向きの視線移動を再現するためには，基準特徴点位置を図 3.7 左下に示すように右に平行移動させ，それらの特徴点に囲まれた領域を眼球領域のテクスチャとする。

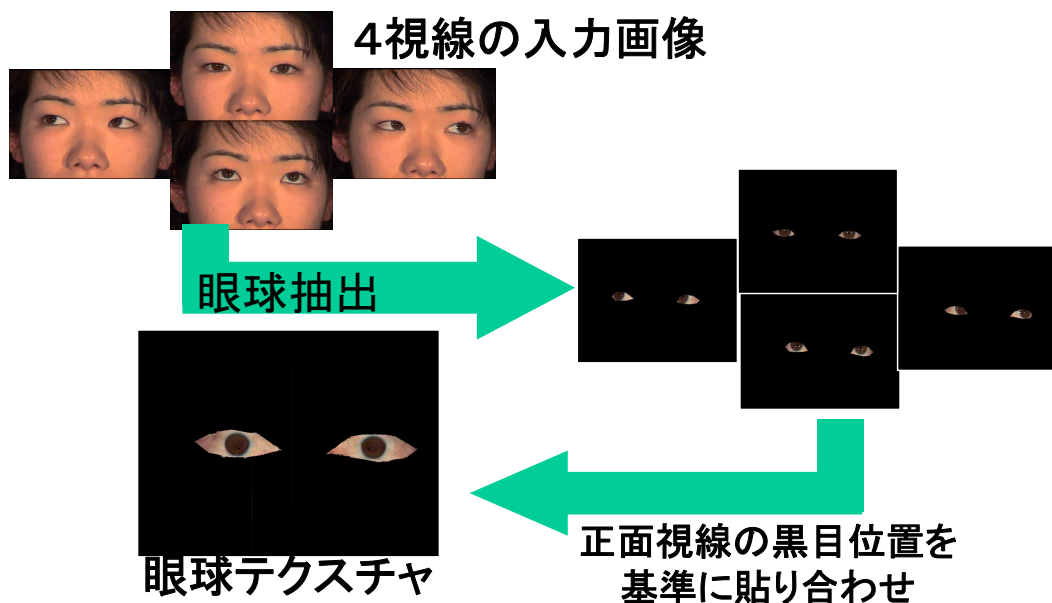


図 3.6: 眼球テクスチャ生成手法

3.5 顔映像のリアルタイム生成

顔映像のリアルタイム生成を行う前準備として、これまでに述べた手法を用いてオフラインであらかじめ3次元モデル，展開テクスチャ，眼球テクスチャを用意する．これによりレンダリング処理の際の計算コストを大幅に削減することに成功した．リアルタイム顔映像生成の流れを図 3.8 に示す．

3次元モデルの入力は，図 3.8 に示すように眼を開いた3次元モデルと眼を閉じた3次元モデルである．この2つの3次元モデルを内挿し，任意のまぶたの状態を持つ3次元モデルを生成する．このまぶたの状態に併せて3つの状態の展開テクスチャから最も適切な展開テクスチャを選択しテクスチャマッピングを行う．これらの手法により，まぶたの動きを含む任意方向及び任意視線の顔映像をビデオレートで生成することが可能となった．

3.6 顔映像生成結果と考察

顔映像生成結果の例を図 3.9 に示す．まぶたの動きを含む任意視線，任意方向の顔画像が自然に表現できていることが確認できる．次に，従来手法と比較しながらモデリング，テクスチャマッピング，処理速度について述べる．

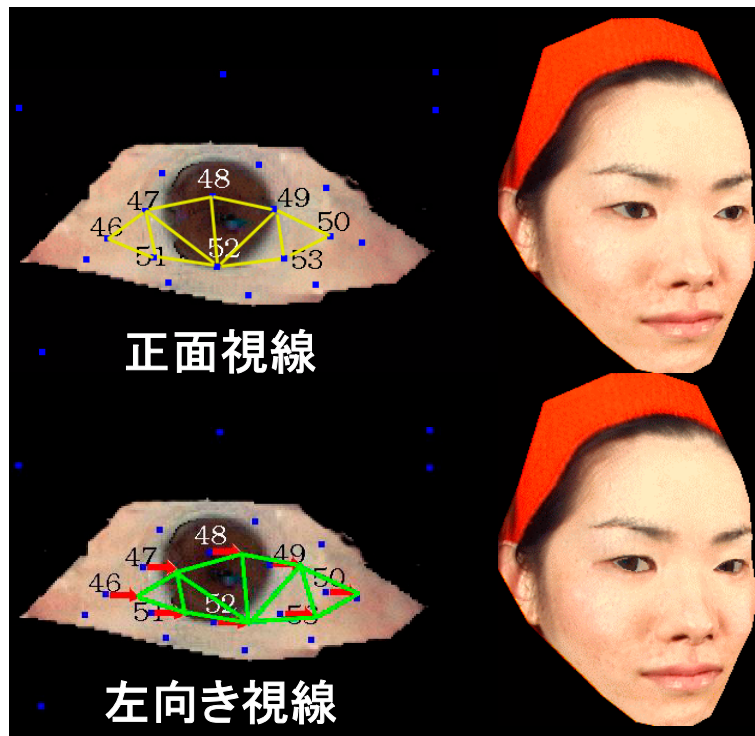


図 3.7: 視線移動

3.6.1 モデリング

従来手法の顔映像生成を簡単に説明する．任意方向から見た場合の特徴点の 2 次元座標は，2 方向から見た時の特徴点の 2 次元座標の線形結合で求めることができる [19]．従来手法では，入力顔画像 2 枚の全特徴点から，この任意の見え方の 2 次元座標を求める計算をフレーム毎に行う．この手法の計算コストは全て CPU への負担となり OpenGL の特性である GPU を活用したレンダリングをしていない．

現手法は，3 枚の入力画像の特徴点座標から 3 次元モデルを算出することで，リアルタイム時の任意の見え方の生成をハードウェア上で取り扱えるため，GPU を利用した高速なレンダリングが実現可能である．

3.6.2 処理速度

従来手法と現手法の処理速度について考察する．まず，処理の流れを大まかに図 3.10 に示す，図 3.10(a) に示すように，従来手法では，その処理の全てを各フレーム毎に行う非効率的な処理の流れだった．現手法では，テクスチャのブレンディングから 3 次元モデルの算出までをオフラインにすることで，レンダリング時における計算コストの削減に成功している．また，レンダリング時には，GPU を活用した 3 次元モデルの座標変換，テクスチャマッピング

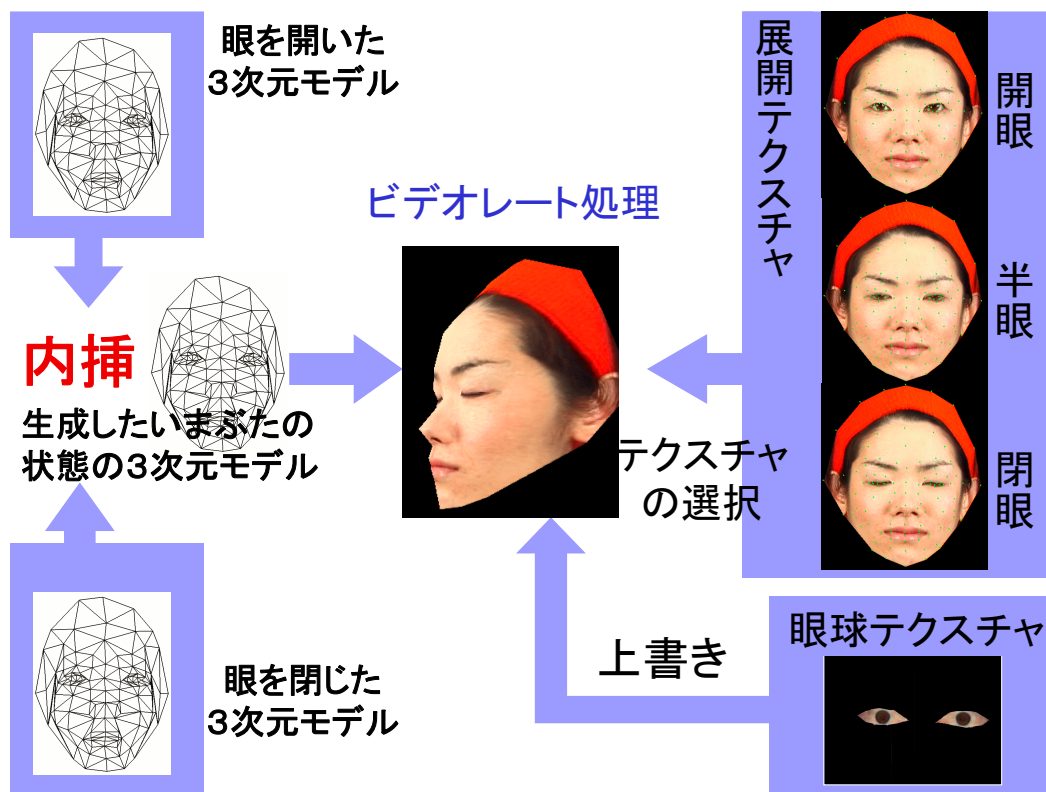


図 3.8: リアルタイム顔映像生成の流れ

を行うため，CPU にかかる計算コストをここでも削減することに成功している．

この処理速度の結果を表 3.1 と表 3.2 に示す．同様に使用した PC2 種類「Dell Precision 330」と「Dell Precision 220」のスペックも，表 3.1 と表 3.2 に示す．どちらの PC の結果を見ても，現手法の方がフレームレートが高いことがわかる．この顔映像生成のプログラムでは，処理のスレッド化などは行っていないため Dual CPU の性能はあまりいかされていないと考えられる．このため CPU が速く，また Video Card も上位の種である「Dell Precision 330」の方が高速なレンダリングが可能なのである．本研究では，複合現実空間での利用を目的とするため計算コストが低く，高速なレンダリングが可能で望ましい．現手法はこれを十分に満たしていると考えられる．

3.6.3 問題点

この 3 方向からの顔画像を入力とする手法では，顔写真から撮影したテクスチャを利用することで，肌の質感や表情などをリアルに再現している．しかしながら，テクスチャの画質に対して，3 次元形状は荒い欠点がある．また，弱中心射影を仮定するために，理論的にも必ず歪みが含まれるという欠点がある．本手法は特別な機材を必要とせず，あらかじめカメラ



図 3.9: 顔映像生成結果

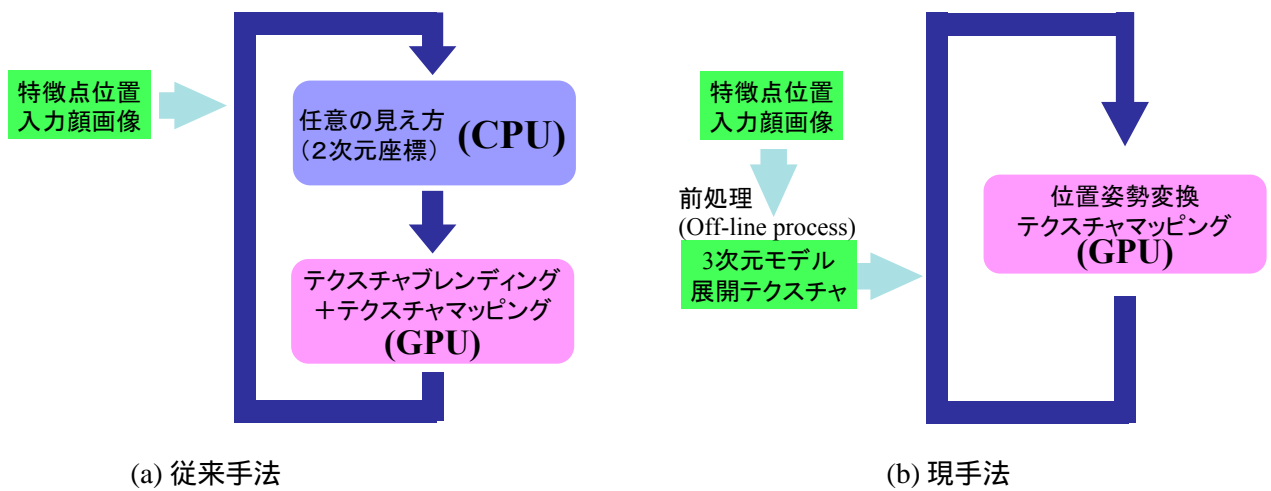


図 3.10: 処理の流れ

表 3.1: Dell Precision 330 スペックとフレーム レート 表 3.2: Dell Precision 220 スペックとフレーム レート

Dell Precision 330	Linux(RedHat7.2)
CPU	Pen4 1.4GHz
Mem	512 MB
Video Card	nVidia quadro2 Pro
従来手法	192[fps]
現手法	747[fps]

Dell Precision 220	Linux(Redhat 7.2)
CPU	Pen3 1GHz x2
Mem	512 MB
Video Card	nVidia Geforce2 GTS
従来手法	162[fps]
現手法	515[fps]

をキャリブレーションする必要もない簡易な顔映像生成手法であるという特徴はあるが、この手法のままで高精細化を図ることは難しいと考えられる。

第4章 スキャナーを利用した高精細顔映像生成

本章では，3次元スキャナーを利用したまぶたの動きを含む任意視線の高精細顔映像生成手法について記す．

4.1 顔映像生成システム

図 4.1 に顔撮影システムの概要を示す．デジタルカメラには Canon EOS-1 Ds を採用し，3次元スキャナーには Konika Minolta VIVID 910 を採用した．まず，3次元スキャナーで高精細な顔の3次元形状を計測し，同時に VGA(640x480 [pix]) のカラー画像を撮影する．この VGA 画像からも顔のテクスチャを獲得することは可能であるが，リアルな顔映像生成を目指すには解像度不足である．これを解決するために，3次元スキャナーの撮影後に高解像度デジタルカメラで顔を撮影し，高解像度な顔テクスチャを獲得する．

スキャナーで計測した顔形状を構成する3次元点が，高解像度画像上のどの位置に対応するのかわかれば，高解像度顔テクスチャを，顔形状にマッピングすることができる．しかしながら，異なる位置姿勢から異なる機材で撮影した顔形状と高解像度顔画像のこのような対応関係は未知である．顔形状を構成する3次元点の中で，高解像度画像上の位置がわかる対応点が複数個存在すれば，キャリブレーションによってその対応関係を算出することができる．しかし，顔形状と高解像度顔画像の間で，このような対応点を直接求めることは困難である．そこで，図 4.1 に示すようにスキャナーカメラの内部パラメータにより顔形状との対応関係が既知である VGA 画像を利用することで，間接的にその対応点を求める．まず，図 4.2 に示すように顔形状やテクスチャの変化の起点となるような位置，118 点に特徴点を定め，VGA 画像と高解像度画像上における位置をそれぞれ手動で定める．これにより特徴点における，高解像度画像と VGA 画像の間での対応が得られる．VGA 画像上の特徴点の位置から，スキャナーカメラの内部パラメータを利用し，3次元顔形状上における特徴点の3次元位置を算出できる．顔形状上にある特徴点の3次元位置と，その特徴点の高解像度画像上での2次元位置の対応からキャリブレーションを行う．これによりスキャナーで計測された顔形状を構成する3次元点が，高解像度画像上のどの位置に対応するか一意に求めることができる．この対応関係を基に，高解像度の顔テクスチャを顔形状にマッピングし，顔モデルを生成する．また，この特徴点はモーフィングのための基準点としても利用する．

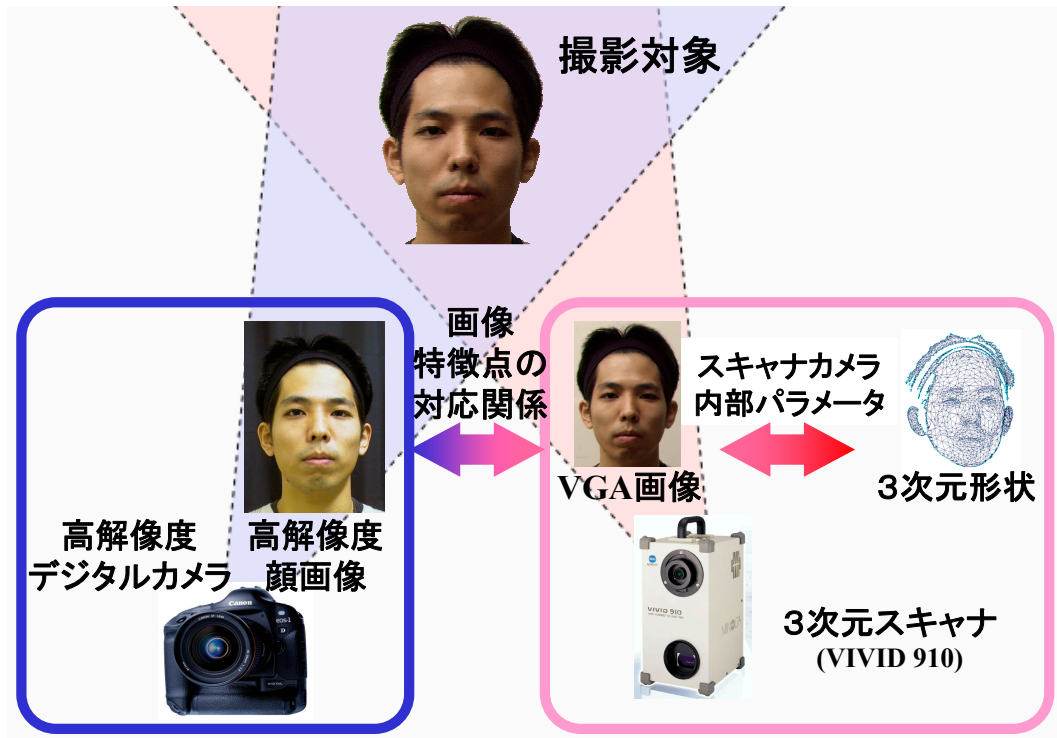


図 4.1: 撮影システム

4.2 まぶたの動きの再現

4.2.1 入力とする顔モデル

竹村らは、合成顔映像と実際の人間の顔の視線認知精度を調べ、視線認知の判断基準が、眼球の移動量だけでなく、視線移動に伴う顔形状の微小な変化も考慮されていると示している [58]。特に、竹村らの合成顔映像では、視線移動に伴うまぶた形状の変化が適切に表現されておらず、これが合成顔映像の視線認知精度に影響したと考えられる。竹村らの顔映像生成では、正面視線の顔と眼を閉じた顔のみを入力顔モデルとした。このため図 4.3 に示すように、正面視線よりまぶたが閉じた場合には、入力モデルの間を補間する内挿法によるモーフィングが可能であるが、上向きの視線でまぶたが大きく開いた場合には、入力モデル外を入力モデルから推定する外挿法によるモーフィングを行う必要があった。2つの入力顔モデルから外挿法により表現した上向き視線を図 4.4 に示す。まぶたが大きく開いているものの、上方向を注視しているようなまぶたの変形が見られず、リアルさに欠けている。そこで、入力顔モデルは多く必要となるが、図 4.5 に示すように入力モデル間のみを補間する内挿法を利用した上向き視線を図 4.6 に示す。これにより上向き視線によるまぶた形状の変化も、歪みの小さい自然な動きを再現した。

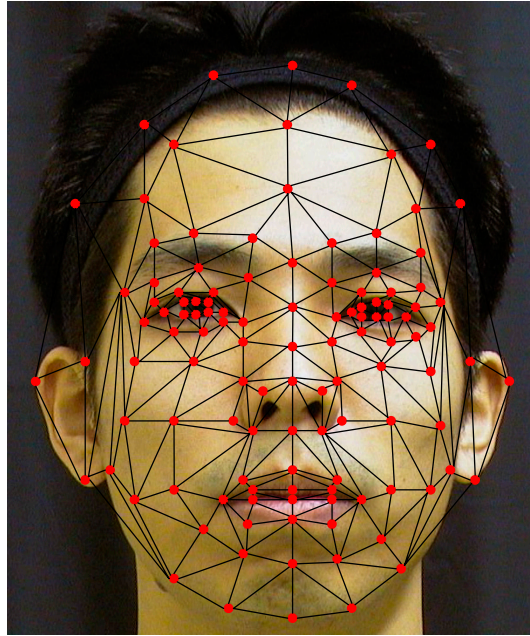


図 4.2: 118 個の特徴点

4.2.2 モーフィング

上向き視線の顔 (upward eye), 正面視線の顔 (open eye), 眼を閉じた顔 (closed eye) の 3 状態の顔モデルを入力として内挿法によるモーフィングを行いまぶたの動きを再現する。モーフィングを行うためには表情変化前の顔形状のある点と、表情変化後の顔形状のどの点に対応するかということがわからなければならない。しかし、3次元スキャナで計測された顔形状の間には、このような対応は存在しない。また、スキャナで計測した全点の対応関係を調べるのは非常に困難である。そこで、顔形状と高解像度顔画像の間でのキャリブレーション時に利用した 118 個の特徴点から再分割を行うことで対応のとれた分割点を生成する。これにより特徴点と分割点によって構成される高精細な顔形状でのモーフィングを実現する。

4.2.3 特徴点再分割

この特徴点は、同一表情の VGA 画像や高解像度画像、顔形状の間で対応がとれているだけでなく、表情変化の前と後においても対応が取れている。この特徴点を基にして、VGA 画像上における表情変化前の特徴点 A と B の中点は、表情変化後においても特徴点 A と B の中点であるという近似を仮定し、図 4.8 に示すように分割を繰り返す。1 回目の分割で得た点を 1st divided point とし、2 回目の分割で得た点を 2nd divided point とする。図 4.7 に示すように、VIVID 画像上で得たこれら分割点に対応する 3 次元座標を、VIVID カメラの内部パラメータを利用して顔形状から算出する。再分割するにつれて算出した分割点と特徴点によっ



図 4.3: 外挿法を含んだ表現

図 4.5: 内挿法による表現



図 4.4: 外挿法による上向き視線の再現



図 4.6: 内挿法による上向き視線の再現

て構成される顔形状の細分化が進み，スキャナで計測した高精細な顔形状を表現することが可能となる．特徴点と各分割点からなる 3 次元形状は，表情変化前後における対応がとれるためモーフィングに利用可能となる．このように 118 個の特徴点を基に再分割し，高精細モデルでのモーフィングを実現する．

4.2.4 パッチ再分割

次に，レンダリングするためには，特徴点と分割点からなる点集合をパッチに分割する必要がある．一般的に遠い点同士を線で結ぶと三角形が細長くなり，精度良く形状を表現することができない．顔形状を精度良く表現するにはドロネー分割を基本としたような最適パッチ生成 [26] を行う必要があると考える．しかし，これらの手法には 2 つの欠点がある．1 つ目は，上記手法でパッチを生成した場合，異なる表情の顔モデルに対して共通したパッチ構成になる保証もなく，モーフィングによる形状変化を表現することについて考慮されていないことである．2 つ目は，与えられた点集合に対し形状を精度良く表現するためにパッチを自動生成する手法であるため，テクスチャや形状変化などの情報を活かしたパッチ分割がされていないことである．

物体の形状変化に対応した手法としては，藤原ら [27] の，ドロネー分割によって生成された三角形パッチに進化的計算を行うことで最適なメッシュを生成する手法がある．また，製品

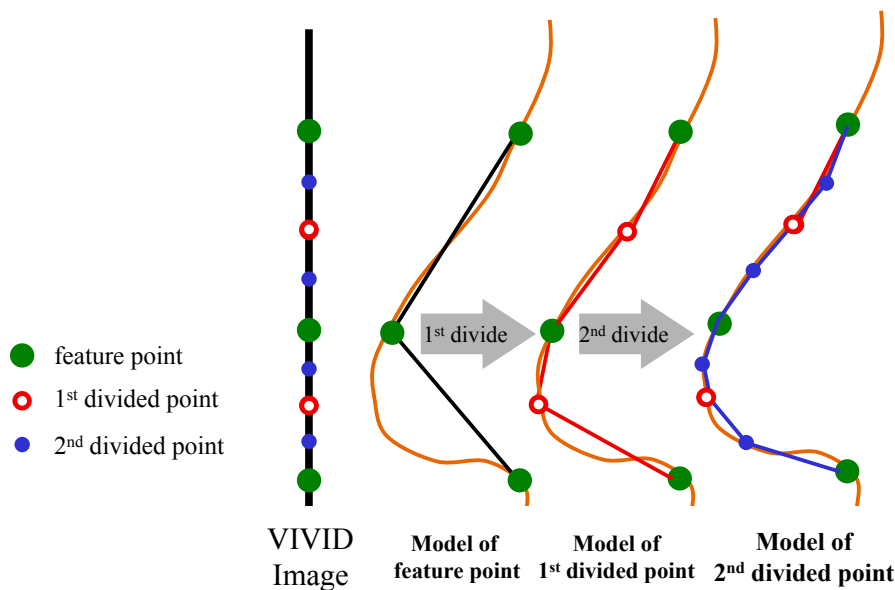


図 4.7: 再分割の断面図

強度を予測するシミュレーションに分割されたパッチやメッシュを利用するものがある．大きく変形した物体に対しては再度パッチ分割しながらシミュレーションを行う [28]．これらの手法は形状変化に対応しているものの，形状変化に応じて最適なパッチを構成しなおすため計算コストが高く，リアルタイムでの形状変化には対応していない．また，本研究のように内挿のみを利用したモーフィングの場合，最大の変形量が既知であるため，計算コストの高いパッチ分割をリアルタイムで行う必要性は低い．複合現実空間における利用を考慮すればリアルタイムでのモーフィング中に，このようなパッチ分割を随時行うのは計算コストが高く実用的でない．また，GPU による高速レンダリングが可能のため，パッチや頂点数の多少の増加よりも，パッチ分割などの CPU による計算が必要な処理は極力減らすべきである．

本研究では，入力とするすべての表情の顔モデルに共通のパッチとすることで，リアルタイム処理でのパッチ分割を省き，あらかじめオフライン処理において一度だけパッチ分割を行うものとする．これにより，レンダリング中の計算コストを削減する．表情変化による形状の変化は，共通のパッチを持った入力顔モデルの間で対応する特徴点，分割点を内挿することでモーフィングを行う．また，2つ目の問題に対しては，テクスチャの模様や，モーフィングによる形状変化を考慮し手動で適切な位置に特徴点を配置し，適切なパッチ分割を行うことで対応する．

異なる表情の顔モデルに対しても共通なパッチを生成するために，特徴点に手動で与えた三角形パッチを規則に従って再分割させる．このような場合にも細長い三角形パッチが生成されることは，精度良く形状を近似するためには望ましくない．このような問題を解決したパッチの再分割手法の例を図 4.10 に示す．図 4.10 上に示す手法は，三角形の最も長い辺の中点で分割するため，極端に細長い三角形が生成されることはない．図 4.10 下に示す手法は，

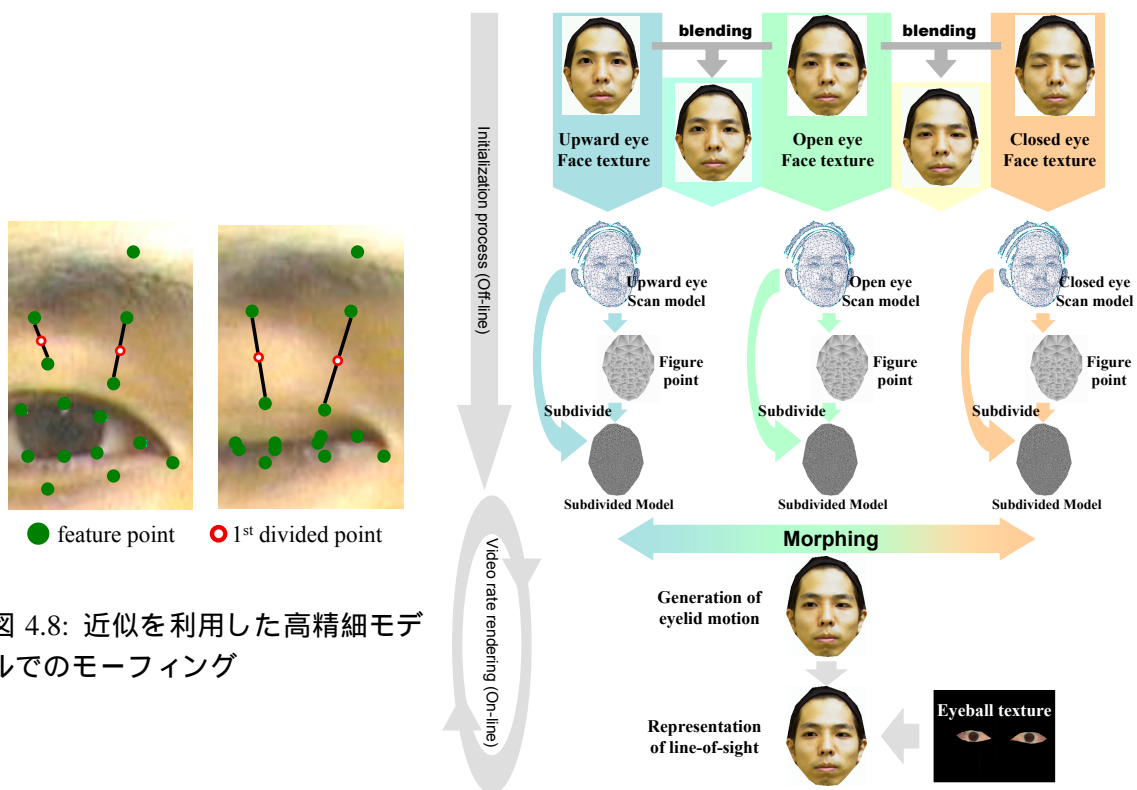


図 4.8: 近似を利用した高精細モデルでのモーフィング

図 4.9: レンダリングの流れ

三角形の各辺の中点で分割するため，初期の三角形パッチと相似で面積が 4 分の 1 である三角形を 4 つ作り出す．このため初期の三角形パッチの形状が細長くなければ，細長い三角形が生成されることはない．それぞれの手法で分割し，この 3 次元座標を求めた場合を図 4.11 に示す．図 4.11 上に示すように，ある辺を共有する二つのパッチが存在し，一方はこの辺の中点で分割を行い，もう一方はこの辺で分割を行わなかった場合を考える．この分割点における 3 次元座標を算出しパッチを張ると隙間が生じる問題が生じる．このような問題に対応するために図 4.11 下に示すように，それぞれの辺の中点で分割する．この手法で分割を行えば，図 4.11 下に示すように隣り合うパッチの辺がかならず中点で分割される．このためパッチに隙間が生じるような問題は回避できる．

4.2.5 特徴点とパッチの最適配置

本研究のように特徴点再分割やパッチ再分割を利用した場合，初期の特徴点位置やパッチの指定が最終的な映像の画質に大きく影響を及ぼす．例えば，滑らかな表面を表現するためには，少ない点で精度良く近似が可能であるが，鼻や，唇のような曲率の高い部分には，多くの点を用いなければ精度良く表現することが難しい．また，テクスチャの模様の変化が大き

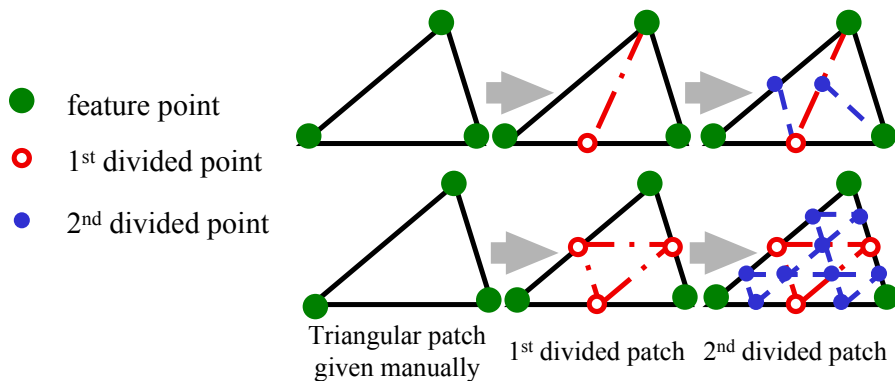


図 4.10: パッチ分割手法

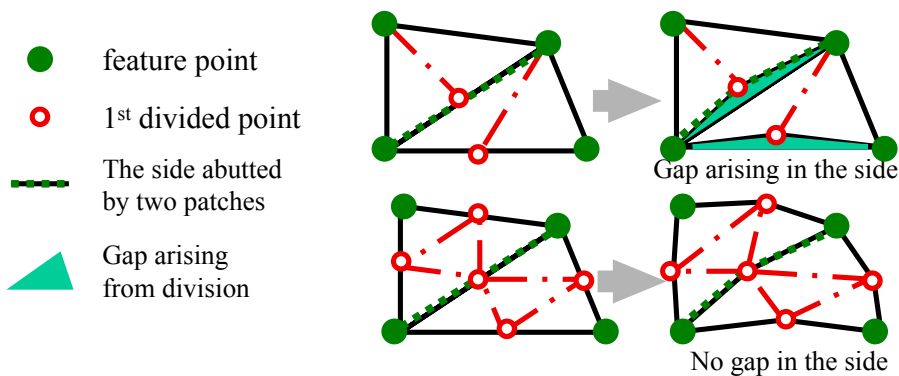


図 4.11: パッチ間の隙間問題

な領域は、模様の変化が小さな領域と比較して位置ずれが目立つため、形状に限らずテクスチャの模様の変化が大きな領域に対しても同じことがいえる。このため初期の特徴点の配置で、テクスチャや形状の変化が大きい領域には特徴点を密に配置することで上記問題に対応する。

また、分割点を近似によって生成するために生じる誤差を考慮した特徴点配置や初期のパッチ指定も重要である。図 4.12 は、初期の特徴点配置とパッチ指定の違いが、形状変化後に及ぼす影響を示している。ただし、ここではモーフィングした場合の形状変化が一様でない場合に生じる弊害の例を示す。一様ではない変形とは、下側のテクスチャの変形が大きく、上側のテクスチャの変形は小さい場合を仮定する。このような変形は、例えば眼の開閉を表現する場合のまぶた付近で生じ、まぶたの変形量は大きいがまゆげ辺りでは眼の開閉に伴う変形は小さい。

まず、図 4.12(a) 左に示すような特徴点配置とパッチを初期に与えた場合、分割点はテクスチャの境界に位置する。しかし、上下の変形量が異なるため形状変化後の分割点は、図 4.12(a) 右に示すように下側のテクスチャ内部に配置されてしまう位置ずれが生じている。また、図

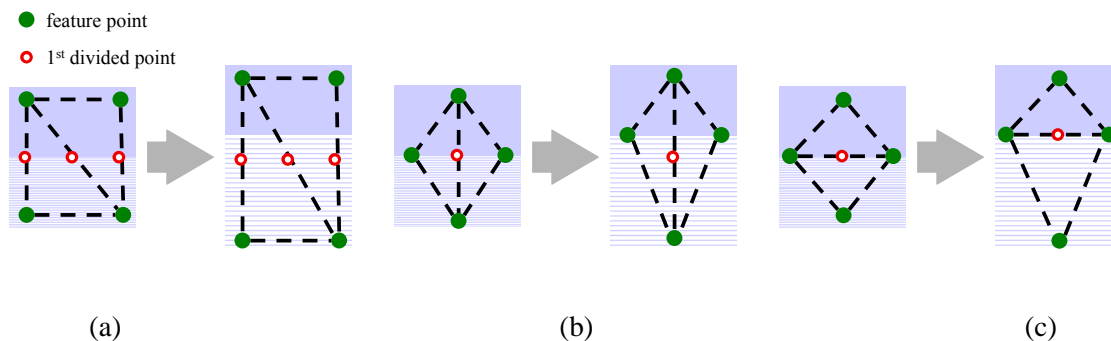


図 4.12: 最適パッチ分割

4.12(b) と (c) に示すような同一の特徴点配置でも，初期のパッチ指定の違いによって分割点に生じる誤差が異なる．このように特徴点の配置だけでなくパッチについても図 4.12(c) に示すようなテクスチャの模様にあわせたパッチ分割を行うべきである．これはテクスチャの模様に変化する境界では，位置ずれによる誤差が非常に目立つことに起因する．もし，同一の模様のみで構成されるパッチ内部で誤差が生じたのであれば，このような位置ずれは目立たない．このような分割点に生じる誤差やテクスチャの模様の変化を考慮した上で，図 4.12 に示すような特徴点配置と初期パッチを指定する．本研究では，図 4.2 に示すような適切な特徴点配置に，適切な初期パッチを与えた．

4.3 視線の再現

実際の人間の視線移動は眼球の 3 次元回転運動によるものであるが，本研究では 2 次元の眼球テクスチャを利用し，これを平行移動させることで任意視線の再現を行う．まず，視線方向の異なる複数枚の正面顔画像の眼球部分を抽出する．抽出した眼球は，正面視線の黒目位置を基準として他の視線方向の眼球部分を重ね合わせて眼球テクスチャを生成する．この眼球テクスチャに与えられた正面視線の場合の基準特徴点位置から平行移動させてテクスチャマッピングすることで視線移動の再現を行う．

また，上を見ると自然と開くまぶたや，下を見ると自然と閉じるまぶたも，視線方向とまぶたの関係を実顔画像から調べることで再現する．横方向の視線移動がまぶたや顔形状へ与える影響は少ないため，ここでは上下の視線移動に伴うまぶた形状の変化を再現する．

4.4 実験結果

4.4.1 処理の流れ

まぶたの動きをより自然に再現するために 3 つの入力顔 (upward eye, open eye, closed eye) を利用した．この入力顔から顔映像を生成する処理の流れを図 4.9 に示す．複合現実空間にお

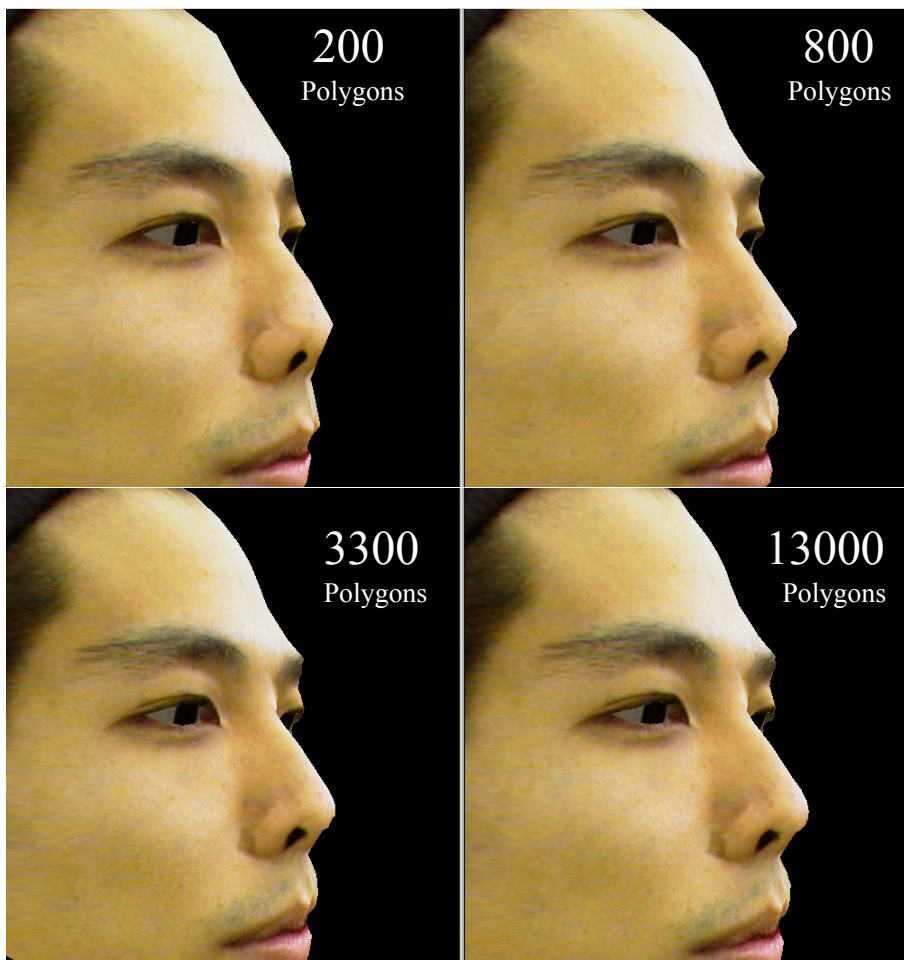


図 4.13: 再分割による細分化の結果

けるアイコンタクト復元のための顔映像生成は、ビデオレートでレンダリングが可能であり、計算コストの低い手法が望まれる。そこで顔映像生成の処理を、計算コストは高いがあらかじめ計算可能なオフライン処理と、リアルタイムで行う必要のあるオンライン処理に分割することで、オンライン処理における計算コストを大幅に削減した。

まず、半眼のような顔形状には、テクスチャをブレンディングして利用したい。しかし、リアルタイムでの顔映像生成にはテクスチャのブレンディングは計算コストが高く不向きである。そこで、図 4.9 に示すようにそれぞれの入力顔画像をあらかじめブレンディングし中間の顔画像を生成する。このようにしてブレンディングした顔画像を含めた 5 状態の顔画像のテクスチャをモーフィングした顔形状の状態に合わせて、切り替えてマッピングすることにより計算コストを抑えながら、高品質な顔映像を生成した。次に、再分割による分割点やその 3 次元位置の算出、パッチ分割など、細分化された顔形状でモーフィング可能なデータをそろえる処理も、計算コストが高いためオフライン処理としてあらかじめ行うことで、オンライ



図 4.14: まぶたの動きを再現した合成顔画像

ン処理時の計算コストを削減した。

このように表情変化や顔の向きに関連する処理のみをビデオレート処理することで大幅にレンダリングのコストを抑えることに成功した。

4.4.2 映像生成の結果

再分割を 0 回から 3 回行った結果を図 4.13 に示す。鼻の頭や、額の輪郭を見れば、再分割するにつれてなめらかになる形状が確認できる。ただし、3 次元スキャナで計測した形状よりも細分化することは、必要以上に分割点とパッチの数を増やすだけである。分割数 2, 3 回程度までは再分割による妥当な成果が得られると思われる。

再現したまぶたの動き図 4.14 に示す。まぶたの動きをすべて内挿によるモーフィングで表現することで、まぶたの変形がリアルに再現されていることが確認できる。視線方向の変化に伴うまぶたの動きを含めた任意視線の合成顔画像の例を図 4.15 に示す。あらかじめ視線方向の変化に伴うまぶた形状の変化を計測し、これを合成顔映像の視線に反映させることで視線移動に伴う自然なまぶたの動きを再現した。上向き視線の顔モデルも入力に加えることで、上を見ると自然と開くまぶたがリアルに再現されている。視線方向によって変化するまぶたの動きをよりリアルに再現できたことが確認できる。

4.5 まとめと考察

協調型複合現実空間において HMD を装着することによって失われた視線情報を復元するために、高精細な顔映像を 3 次元スキャナと高解像度デジタルカメラを利用して生成した。また、入力顔モデルに、眼を閉じた顔、眼を開いた顔、上向き視線の顔を与えることで、まぶ

たの動きを内挿により表現し視線情報をよりリアルに再現した。また，あらかじめ視線方向の変化に伴うまぶた形状の変化も調べることで，視線移動に伴うまぶたの変形もリアルに再現することに成功した。また，手動で与えた適切な特徴点とパッチの再分割を行うことで，3次元スキャナで撮影された異なる表情の高精細な顔形状でのモーフィングを実現した。

ブレンディングを行ったテクスチャは領域によっては不適切である領域が存在する。二重まぶたやしわなどが，その例として挙げられる。しわに折り込まれて見えなかった領域が，伸ばされると見えるようになる。もし，しわの状態と伸ばされた状態を入力として，その中間の状態をブレンディングにより表現すると，本来であればしわの形状が変形しているはずであるが，ブレンディングしたテクスチャでは，しわがぼかされているような表現にしかならない。今回の顔映像生成では計測した顔形状と高解像度画像は同数だけ用意した。これに対し入力顔形状よりも多くの高解像度顔画像を入力とすることで，テクスチャブレンディングによる画質の劣化を避け高画質な顔映像を生成することも可能であると考えられる。

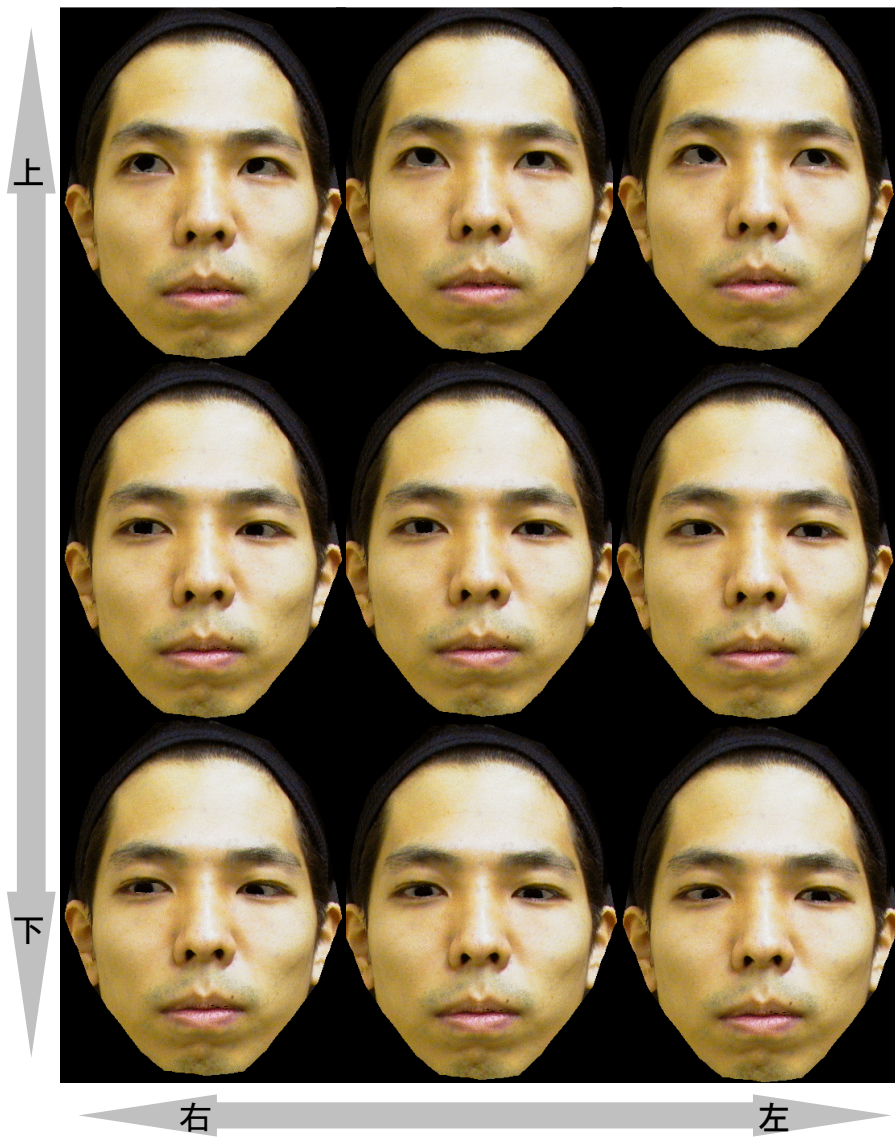


図 4.15: 視線移動とそれに伴うまぶたの動きを再現した合成顔画像

第5章 視線検出

HMDを装着したユーザの視線や眼の表情を復元するためには、ユーザの視線情報が必要である。本研究では図5.1に示す、光学シースルーHMDに取り付けた視線検出機構を用いてリアルタイムで視線情報の計測を行う。

5.1 視線検出機構

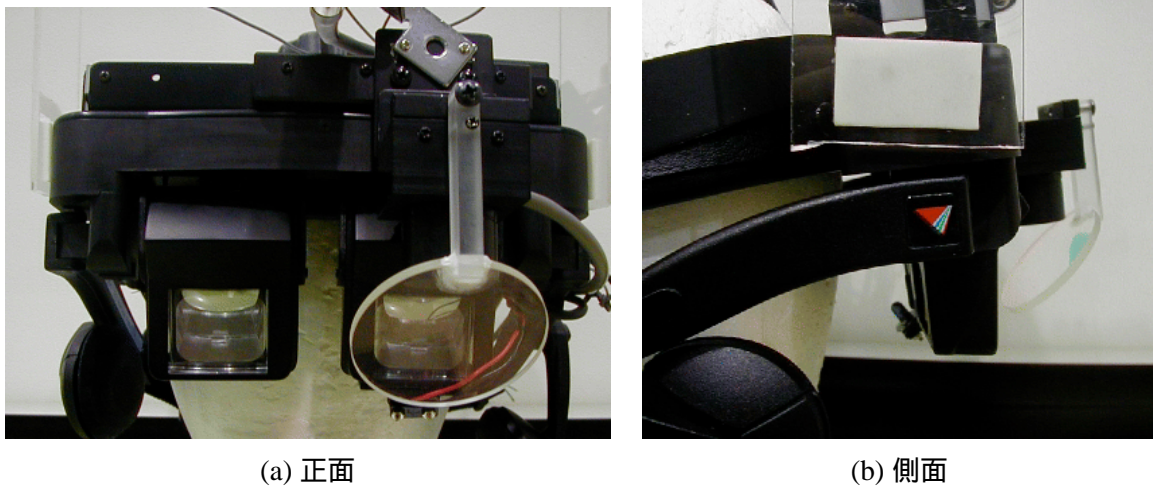


図 5.1: 視線検出機構付き HMD

本研究では光学シースルー型 HMD に取り付けられた ISCAN 製の視線検出機構で、視線情報の計測を行った。この視線検出機構のシステムを図 5.2 に示す。眼球下部から赤外線 LED を眼球に照射する。この様子は光学シースルー型 HMD のディスプレイを通過して、赤外線ハーフミラーで反射され視線検出用のカメラで撮影される。この視線検出システムは、上記カメラで撮影された映像から、画像処理することで瞳孔中心と角膜反射点を求め、この値からユーザーの視線方向を算出する。赤外線 LED を眼球に照射したことによってできる角膜反射点は、HMD が頭部でずれた時の視線方向の補正に用いられる。本研究では、これらのうち瞳孔中心情報のみを用いてユーザの視線を復元する。視線検出機構の詳細な仕様は付録の表

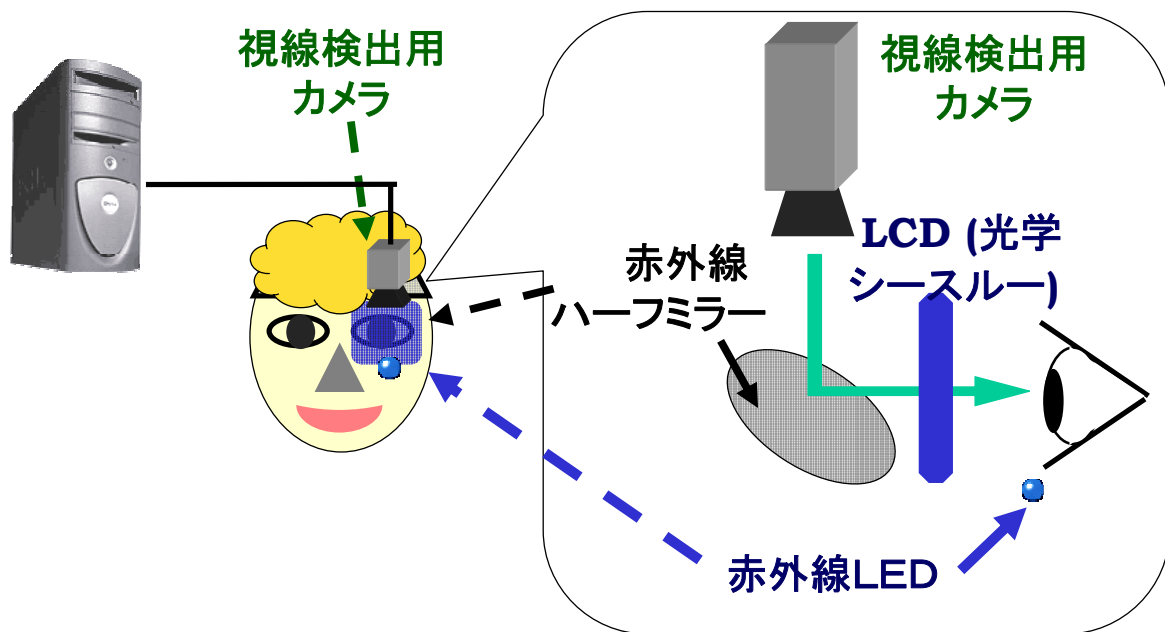


図 5.2: 視線検出機構システム図

9.2 に示す。

5.2 視線再現手法

5.2.1 視線映像の生成

実際の人間の視線移動は眼球の 3 次元的な回転運動により生じるが、本研究では眼球を平面と仮定し、黒眼を平行移動させることにより視線を再現する。また、瞳孔の中心位置を黒眼の中心位置とすることで、視線検出機構から得られる瞳孔位置情報を基に視線の復元を行う。ただし、現在使用している視線検出機構は左眼だけに付いるため、右眼の瞳孔位置情報を得ることはできない。そこで視線検出機構から瞳孔位置と同時に出力される注視点位置を利用し、左右の眼球の輻輳角を推定して右眼の瞳孔位置を求める。まぶたは、上方向を注視すると自然に開き、下方向を注視すると自然に閉じる。このような注視方向とまぶた形状の変化についても関係をあらかじめ計測し、再現する。

5.2.2 注視点キャリブレーション

瞳孔移動量と注視方向の関係を調べるために、あらかじめ注視点キャリブレーションを行う。ユーザの顔を固定し、注視点キャリブレーション用マーカー計 9 個を順に注視する。マーカーの配置を、図 5.3 右に示す。図 5.3 左に、眼球とマーカーを上から見た位置関係を示す。

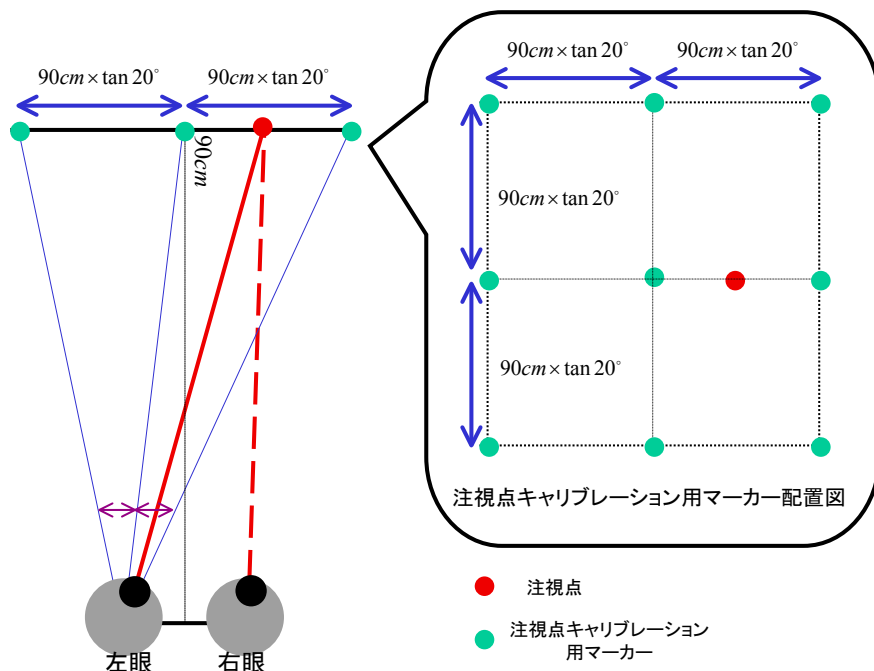


図 5.3: 注視点キャリブレーション

ユーザがマーカを注視した時の注視点と瞳孔位置の関係をあらかじめ計測しておくことで、瞳孔移動量から注視方向を得ることが可能となる。

注視点キャリブレーションにより、図 5.3 に示すように左眼から伸びた赤い実線が示す左眼の注視方向を得ることができる。注視する点の奥行きが既知であれば、注視方向と奥行き情報から注視点を得ることができる。

5.2.3 注視方向と瞳孔移動量の関係

通常、右眼と左眼は同じ位置を注視するため、注視点が既知であれば、注視点と眼球を結ぶ線がその眼の注視方向となる。図 5.3 に示すように奥行きが既知であれば、左眼の注視方向から求めた注視点と右眼を結ぶ点線を右眼の注視方向として得ることができる。

図 5.4 右は、ユーザがマーカを注視した時の注視方向を示す。人間の眼の視線方向と瞳孔移動量の関係はほぼ左右対称であると仮定する。例えば図 5.4 左に示すように、右眼で右側角度 20° の方向(外)を見たときの瞳孔移動量と、左眼で左側角度 20° の方向(外)を見たときの瞳孔移動量は左右対称である。

本研究では、視線方向と瞳孔移動量の関係は左右対称という仮定と、左眼と右眼は同時に同一注視点を見るという仮定に基づいて視線の復元を行った。

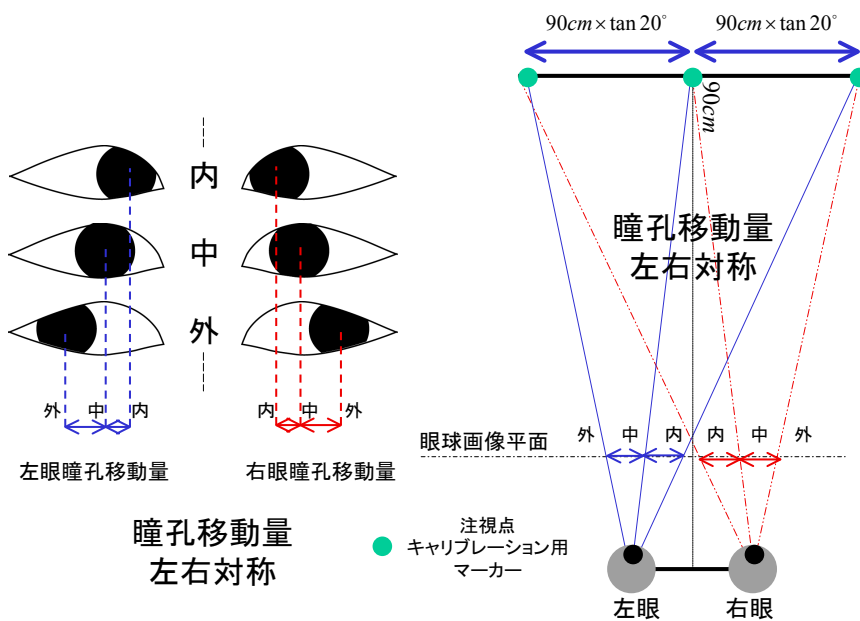
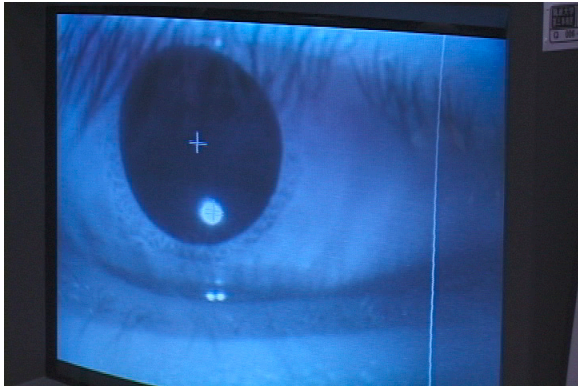


図 5.4: 輻輳の再現

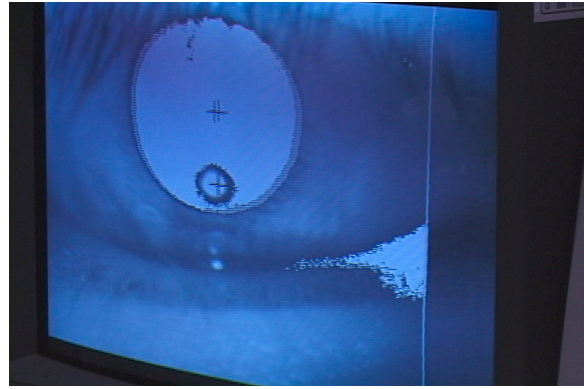
5.3 視線検出結果と考察

図 5.5(a) に示す画像が、この視線検出用カメラで撮影された眼球画像である。図 5.5(b) に示す画像が、画像処理後の眼球画像である。黒目部分は 2 値化処理され白く抜けている。図 5.5(b) に示す、大きな白い円の中央にある + 印が瞳孔中心を表している。本研究では、視線方向や角膜反射点は利用せず、この瞳孔中心が黒目の中心であると仮定し視線の再現を行った。

視線検出機構を頭部に装着した際の、実験中における位置ずれはおこらないものと仮定しているが、実際には HMD 自体の重量により長時間装着するほどずれ落ちてくるなどの状況が観察された。このシステムは周囲の照明変化の影響を受けやすいという欠点がある。また、グレースケールの眼球画像をある閾値で 2 値化して処理を行っている。この閾値は GUI を使用して簡単に変更することができるが、照明状況の変化に動的に対応することができない。このため、ユーザが首を回すような場合に顔に対する照明環境の変化が眼球映像の輝度に影響し、視線情報をうまく計測できないという問題も発生した。また、このような場合はノイズがのりやすいという欠点もあった。



(a) 画像処理前



(b) 画像処理後

図 5.5: 眼球画像

第6章 顔映像重畳による視線情報の復元

本章では，複合現実空間における顔映像の重畳手法についてのべる．また，本システムでの幾何学的整合性の精度と時間的整合性の精度，及び理想値（理論値）について言及する．

6.1 座標系の定義

現実世界に仮想世界を重畳するために，我々が定義した座標系を図 6.1 に示す．一方のユーザを被重畳者とし，もう一方のユーザを観察者として座標系の定義を行っている．しかし，理論的には両者にとって別々に座標系を定義することで，両者が観察者になりうる座標系の定義である．これら座標系の説明を以下に記す．

世界座標系

仮想物体や仮想情報を提示する際に使用する座標系．現実世界に固定の座標系であり，仮想物体や仮想情報を重畳する上で便利な場所を原点として定める．

センサ座標系

本システムの座標変換において中心的な座標系．赤外線センサ本体の 3 眼ある受光部の中で中心の受光部を座標系原点とする．マーカーの位置情報は，このセンサ座標系における位置情報として計測することができる．

観察者カメラ座標系

観察者カメラを原点とする座標系．仮想物体や仮想情報など，観察者への提示映像は，全てこの座標系での位置情報を利用する．

観察者マーカー座標系

観察者カメラ座標系とセンサ座標系の関係を求めるために，間接的に利用する座標系．マーカーを原点とし，観察者マーカー座標系とセンサ座標系の関係を，マーカー位置情報を利用してリアルタイムで算出する．

被重畳者顔座標系

被重畳者の顔と合成顔映像の位置合わせを行うための座標系．

被重畳者マーカー座標系

被重畳者顔座標系とセンサ座標系の関係を求めるために間接的に利用する座標系．マーカーを原点とし，被重畳者マーカー座標系とセンサ座標系の関係を，マーカー位置情報を利用してリアルタイムで算出する．

被重畳者の HMD を仮想的に消去し視線情報を復元するためには，観察者カメラ座標系における被重畳者の顔の位置姿勢が必要となる．本システムではセンサ座標系を中心として他座標系の定義を行った．これは観察者マーカー座標系と被重畳者マーカー座標系の平行移動成分を，センサ座標系で扱うためである．センサから得られたマーカー座標系での平行移動成分は，座標変換を行わないセンサ座標系のままで取り扱うことで，誤差を含んだ回転行列を平行移動に掛けることによる誤差拡大を抑えるために有効である．

センサ座標系との関係を直接算出することが難しい座標系の関係を得るために，被重畳者マーカー座標系と観察者マーカー座標系を間接的に利用してセンサ座標系との関係を算出する．本来であれば，観察者カメラ座標系とセンサ座標系の関係を直接求められることが望ましいが，そのためにはマーカーをカメラ座標系の既知の位置に配置する必要がある．しかし，そのような配置を誤差なく行うことは困難である．これは被重畳者顔座標系についても同様のことがいえる．そこで，それぞれの座標系の間マーカー座標系を定義し間接的にセンサ座標系との関係を算出する．

センサ座標系を中心として，図 6.2(a) に示すようにユーザの移動に関わらず常に相対的な位置関係が固定されている部分と，図 6.2(b) に示すようにユーザの移動に伴いリアルタイムで座標系の関係が変化する部分を分けて取り扱う．

6.2 固定位置関係の座標系

本節では，座標系の関係が固定のものに関して，その関係の算出方法について記す．それぞれ算出方法が異なるため，座標系の関係ごとにその詳細を記す．

観察者カメラ座標系と観察者マーカー座標系の関係

固定位置関係である座標系の関係を図 6.2(a) に示す．観察者 HMD に取り付けられているカメラと赤外線マーカーは，その間の相対的位置関係が固定である．よって，観察者マーカー座標系と観察者カメラ座標系の関係は常に固定位置関係といえる．そこで，赤外線マーカーを用い既知の 3 次元パターンを形成し，あらかじめキャリブレーションを行うことでこの位置関係を算出する．赤外線マーカーをカメラ映像中に撮影しながら，マーカーの画像中の位置とその時のマーカー座標系でのマーカーの 3 次元位置を算出し，これを入力データとしたキャリブレーションを行う．このキャリブレーションは最終的に仮想物体の位置ずれに大きく影響するため，精度良く位置関係を算出することが重要である．

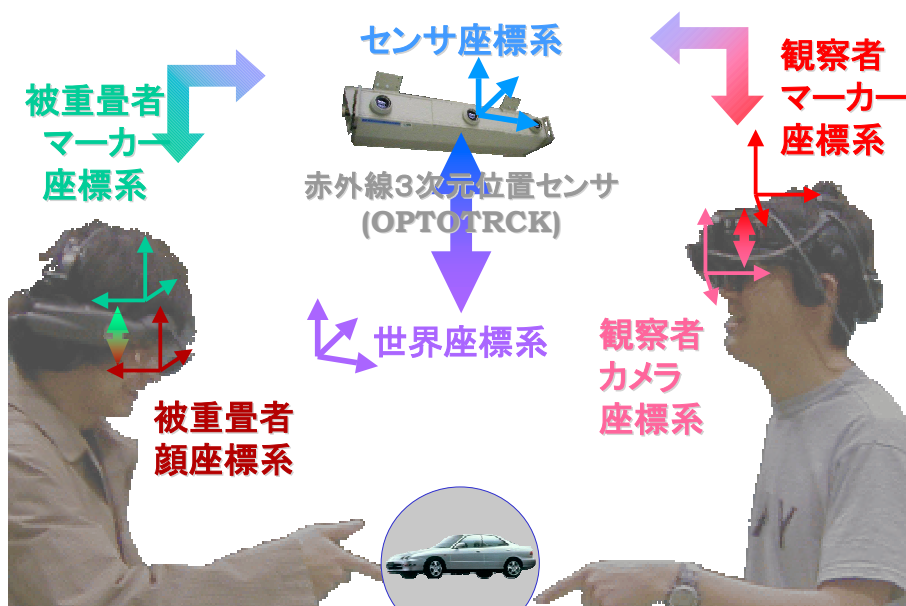


図 6.1: システム座標系.

観察者マーカース座標系とセンサ座標系の関係

次に、センサ本体と世界座標系の関係について記す。これもユーザの移動に伴った位置関係の変化がなく固定位置関係である。現実空間中に仮想世界を重畳をする際に都合の良い位置姿勢で世界座標系を定め、センサ本体と世界座標系との位置関係をあらかじめ算出する。赤外線センサと3次元測量器を利用することにより座標系の関係を算出する。

被重畳者マーカース座標系と被重畳者顔座標系の関係

基本的に被重畳者顔座標系と被重畳者マーカース座標系の関係は固定である。しかしながら、被重畳者の装着したHMDが頭部でずれることがある。また、ユーザが装着する度に、HMD位置は若干であっても異なる位置に固定される。しかし、ずれは無視できる程度であると考え、HMDはユーザの頭部に常に同じ位置に固定されているものとしている。また、この部分は最終的な映像の位置ずれに大きく影響しないことも考慮し、おおまかな位置関係をあらかじめ算出する。

6.3 動的に変化する座標系の位置関係

本節では、ユーザの移動に伴い、動的に変化する座標系の位置関係について記す。リアルタイムに関係を調べる必要のある座標系を図 6.2(b) に示す。センサ本体と各ユーザのHMDに取

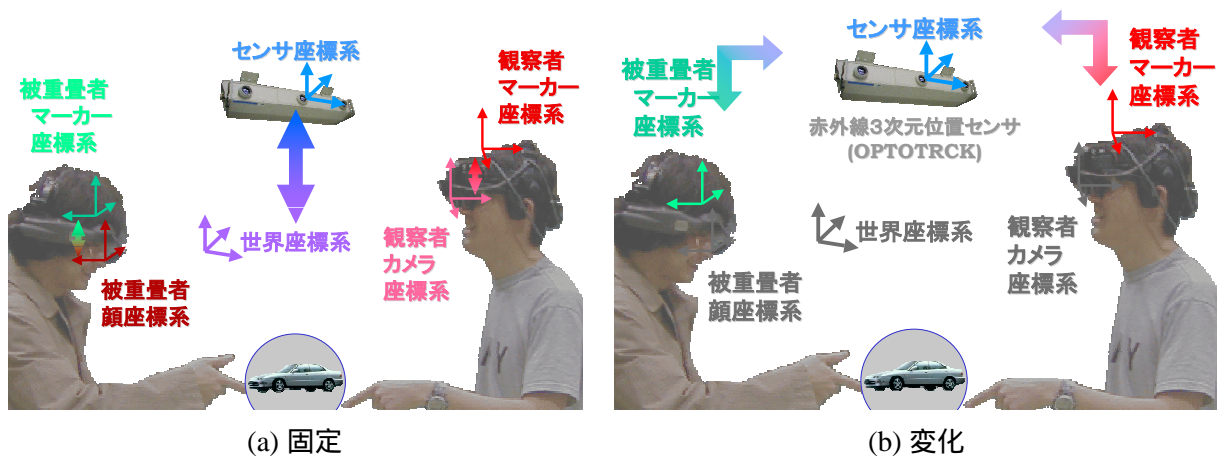


図 6.2: 座標系の相対的位置関係

り付けたマーカの位置関係はユーザの移動に伴い常に変化する．この座標系の関係は，赤外線センサを用いてマーカ位置をリアルタイムで計測することによって算出する．

剛体に取り付けられたマーカ 3 点の位置情報が既知であれば 3 次元空間中のマーカの位置情報から姿勢を算出することができる [29]．しかし，それらのマーカの内 1 点でも位置情報が計測できなければ，姿勢を算出することができなくなる．赤外線センサは赤外線マーカの発した光を，センサ本体が高速に計測するシステムである．しかし，図 6.3 に示すように，このマーカの発光表面がセンサ本体に対して 60° の範囲内を向いていなければ位置を計測することができない．このため，マーカがセンサ本体に対して裏面を見せるような場合や，障害物に光を遮られるような場合は位置データを得ることができない．このため 3 点のみからユーザの姿勢を求める手法ではユーザの行動が大きく制限される結果となる．

複数のユーザが共同作業を行うためには，行動に制限がなく回転可能な範囲が広いことが重要である．本システムでは，この問題に対し 12 点の LED マーカを HMD に散りばめて配置し，そのうち最低 4 点のマーカ位置を計測することができればユーザの位置姿勢を算出することができるシステムを構築する．以下に，マーカ 3 点による位置姿勢算出手法と 12 点による位置姿勢算出手法について詳細を記す．

6.3.1 3点法

剛体に取り付けられたマーカ 3 点の 3 次元位置情報から剛体の位置姿勢を算出する手法について記す．まず，それぞれのマーカを図 6.4 に示すように剛体中に取り付ける．この時の n 番マーカの位置を (x_n, y_n, z_n) で表す ($n = 0, 1, 2$)．図に示す 0 番マーカを原点として，各方向ベクトルを式 (6.1)(6.2) に示すように定義する．

$$\mathbf{a}_1 = (x_1, y_1, z_1) - (x_0, y_0, z_0) \quad (6.1)$$

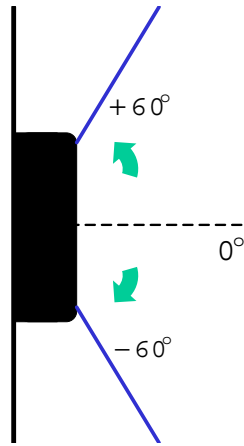


図 6.3: マーカー計測可能角度

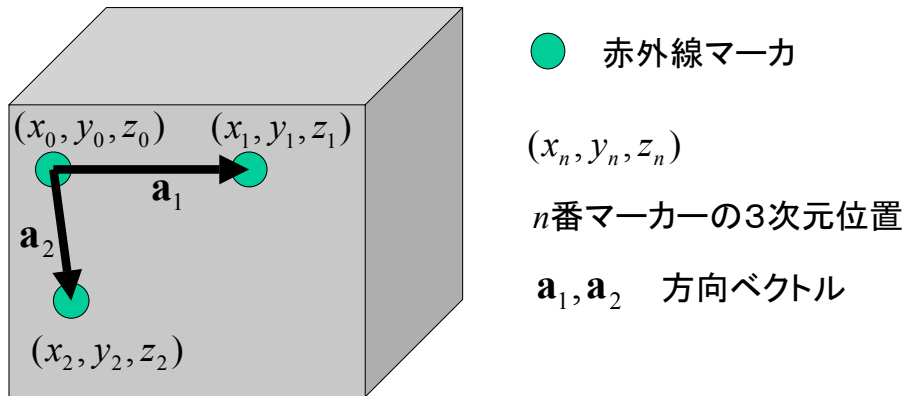


図 6.4: 3点法

$$\mathbf{a}_2 = (x_2, y_2, z_2) - (x_0, y_0, z_0) \quad (6.2)$$

\mathbf{a}_1 の方向を右手座標系の X 軸方向であると定義し，マーカー 3 点を含む平面内で X 軸に直角な Y 軸を定める．このようにして求めた両ベクトルに対し直角なベクトルを Z 軸とすることで剛体の姿勢を算出する．

具体的には， $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ 両ベクトルから正規直交化法を用い，マーカー 3 点を含む平面内に正規化された \mathbf{a}_1 と，これに直交する正規化されたベクトルを求める．まず式 (6.3) に示すように \mathbf{a}_1 を正規化し \mathbf{c}_1 を求める．

$$\mathbf{c}_1 = \frac{1}{|\mathbf{a}_1|} \mathbf{a}_1 \quad (6.3)$$

次に，式 (6.4) に示すようにマーカー 3 点を含む平面内で， \mathbf{c}_1 に直交するように \mathbf{a}'_2 を選ぶ．

$$\mathbf{a}'_2 = \mathbf{a}_2 - (\mathbf{a}_2, \mathbf{c}_1)\mathbf{c}_1 \quad (6.4)$$

これを式 (6.5) で正規化し，更にこの外積を式 (6.6) で求める．

$$\mathbf{c}_2 = \frac{1}{|\mathbf{a}'_2|}\mathbf{a}'_2 \quad (6.5)$$

$$\mathbf{c}_3 = \mathbf{c}_1 \times \mathbf{c}_2 \quad (6.6)$$

座標系変換の回転成分は，生成された各正規化ベクトルで式 (6.7) のように表される．

$$\mathbf{R}_{si} = [\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \mathbf{c}_3] \quad (6.7)$$

平行移動成分は，0番マーカーの原点位置として求められる．この手法は必要マーカー数が3点と少なく，実装が容易である．また，マーカー間の距離を大きくすることで容易に精度を高くすることができる．しかし，前述した通り3点全てのマーカー位置が計測できなければ姿勢を算出することができない．本システムでの利用を考慮すると，3点法はユーザの行動範囲を妨げる要因となりうる．このため本システムにおけるHMDの位置姿勢算出のためには，3点法は実用的ではないと考える．

6.3.2 12点法

上記のような3点法の欠点を補うために，図6.6に示すようにHMDに12点のマーカーを散りばめて配置し12点中4点のマーカー位置が計測できていればHMDの位置姿勢を算出可能な手法を開発し，システムを構築する．まず，HMDに取り付けた全マーカー位置をあらかじめ計測する．この時の3次元位置情報と現在のマーカーの3次元位置情報を比較することで位置姿勢の関係を算出する．位置姿勢を算出するために必要なマーカー数は3点法よりも多い最低4点であるが，どのような組み合わせであろうとも4点以上のマーカーが計測できていれば位置姿勢を算出することが可能である．また，計測可能なマーカー数が多ければ，有効利用し高精度で位置姿勢を算出することができる利点も存在する．また，12点法では図6.5に示すように，3点法に比べ広い行動範囲を実現することができる．

本システムでは，図6.6に示すように，ユーザがどの方向を向いても最低4点のマーカーを計測できるように12点の赤外線マーカーを配置する．これにより，ユーザの回転可能な範囲が広くなりユーザの行動を妨げないシステムの構築を可能とする．一方，3点のシステムでは起こらなかったような短所が12点法には存在する．以下に，その短所を3つ述べる．

マーカー切り替わり時のぶれ問題

これはあらかじめ計測した全マーカーの3次元位置に存在する誤差によって生じる問題である．赤外線センサを利用し，あらかじめ全マーカーの3次元位置を計測し，3次元モデルデー

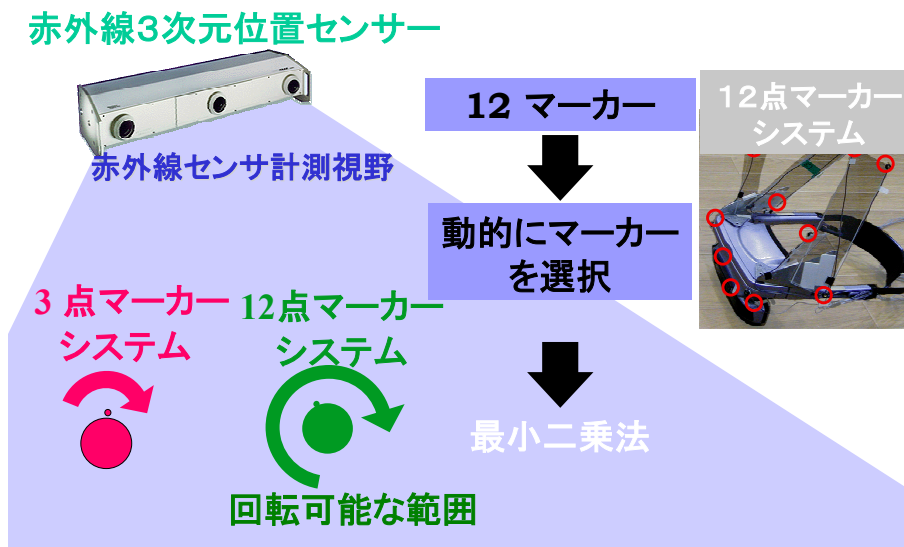


図 6.5: ユーザ回転可能範囲

タとして獲得している。しかし、この3次元位置にも必ず誤差が含まれる。また、この誤差はマーカースystemによっては、z軸に大きな誤差を含んだものや、x軸に誤差を含んだものなど、その誤差の大きさや、どの軸に対する誤差であるかにも違いがある。このため計測可能なマーカースystemが切り替わる時、つまり回転行列を算出するために使用するマーカースystemが切り替わる時に、この誤差のばらつきが原因となったぶれが発生する。

あらかじめ計測するマーカースystemの精度をできる限り高めることで、このぶれを小さく抑えることが可能となる。

オフセット問題

位置データを計測できるマーカースystemが切り替わる際に、回転行列を算出するために利用する原点が変化することによって生じる問題である。本システムでは、マーカースystemには観察者マーカースystemと被重畳者マーカースystemが存在する。オフセットの問題は両マーカースystemに存在する。理論的には共通の内容のため、ここでは両マーカースystemをまとめてマーカースystemとして説明する。

図 6.7(a) に示すように、右目用カメラの真上にあるマーカースystemをマーカースystemの原点マーカースystemとする。12点システムでは、ユーザの姿勢によって利用できるマーカースystemが異なる。このため、常にこのマーカースystemの原点マーカースystem位置が計測できているとは限らない。

ここで、このオフセットの問題を、図 6.7 に示す例をあげて説明する。図 6.7(a) に示す緑色の円で囲まれたマーカースystem 6点の位置が計測可能とする。この場合、計測可能なマーカースystemに原点マーカースystemが含まれている。このため (a) の場合には、オフセットを考慮する必要がない。

次に、計測可能なマーカースystemにマーカースystemの原点マーカースystemが含まれていない場合を考慮

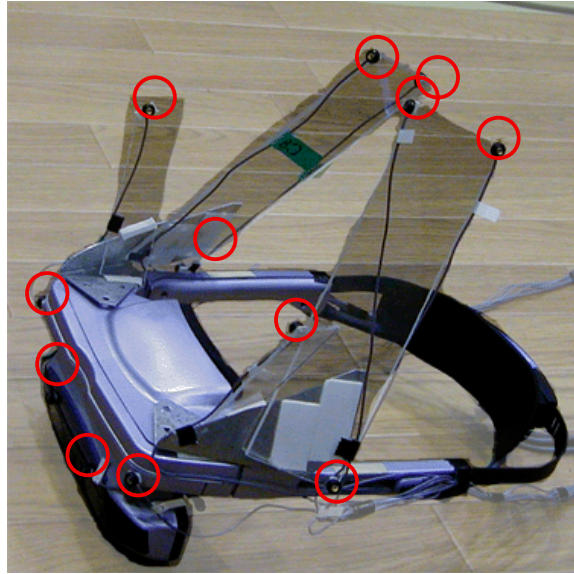


図 6.6: 12 点の赤外線マーカ-を配置した HMD

る．図 6.7(b) に示すように先程の図 6.7(a) で計測可能なマーカ- 6 点から，橙色で示す 2 点のデータが新たに計測できなくなったとする．この場合，位置情報が計測可能なマーカ- 4 点には，マーカ-座標系の原点マーカ-が含まれていない．まず計測可能なマーカ-のうち 1 点を仮原点として回転行列を算出する．次に仮原点からマーカ-座標系の原点マーカ-までの平行移動成分を算出する．この場合，マーカ-座標系での平行移動成分は直接求められないため，あらかじめ算出したマーカ-の 3 次元位置情報により算出した回転行列を掛けてこの平行移動成分を算出する．しかし，算出された回転行列には必ず誤差が存在する．このためマーカ-座標系の原点マーカ-と仮原点の距離が大きい場合や，回転行列自体の誤差が大きい場合には，ぶれ発生の原因の一つになると考えられる．

上記の内容を考慮しマーカ-座標系の原点マーカ-には位置が計測しやすい場所を選んだ．また，原点マーカ-からの距離が近く，なおかつ計測しやすい位置にあるマーカ-ほど仮原点となる優先順位を高く設定した．次に，この観察者マーカ-座標系と観察者カメラ座標系についてのみ生じる問題と，その対策を記す．マーカ-座標系とカメラ座標系の変換には回転と平行移動を含む正確な位置合わせが必要とされる．ここでの位置合わせ精度が最終的な複合現実感における仮想と現実の位置ずれに大きく影響を及ぼすためである．本システムでは，原点マーカ-をできる限り，カメラ座標原点の近くに設置することで誤差を抑える．

独立ベクトル不足問題

12 点システムでは，ユーザがどのような方向を向いても最低 4 点のマーカ-位置情報が計測可能なように HMD にマーカ-を散りばめて配置する．しかしながら，4 点以上の位置情報

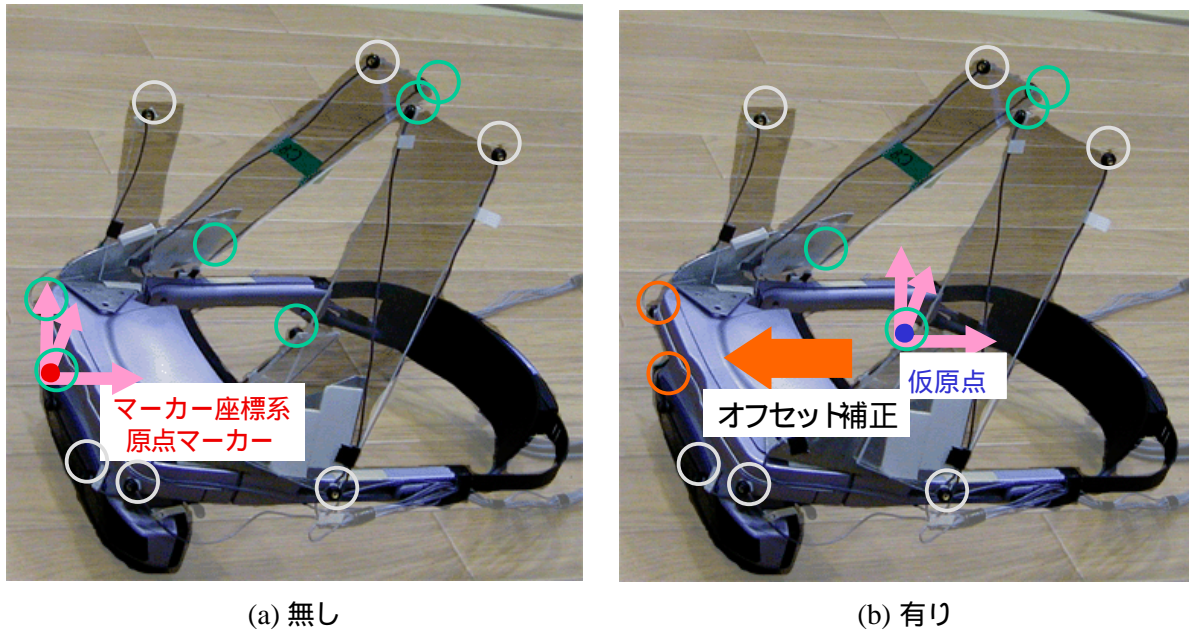


図 6.7: オフセット補正

が計測可能であろうとも，その位置が 3 次元空間中の同一平面上，もしくは同一平面に近い状態に集合してしまった時には精度が極端に低下する．これは，3 法点と異なり回転行列における直交条件などを利用しない算出方法であるため，マーカー位置情報から独立なベクトルとして x, y, z 軸方向を算出できなければ，極端な精度低下が生じる．精度低下の要因については，以下の小節でその詳細を記す．

利用するマーカーによっては，同一平面に近いマーカーのみが計測されることも予想される．そこで，この問題を解決するためにマーカーの配置を考慮し，同時に計測されるマーカーが同一平面上にできる限り並ばないように HMD 上に配置する．

6.3.3 最小二乗法による 3 次元回転行列の算出方法

システムで計測されたマーカーが 5 点の場合における，回転行列の算出手法について説明する．あらかじめ用意されたマーカー位置 5 点の 3 次元モデルデータを $(X_n, Y_n, Z_n)^T$ とする．次に，現在の赤外線センサから得られた，赤外線センサ座標系でのマーカー位置を $(x_n, y_n, z_n)^T$ とする．(ただし， $n = 0 \sim 4$ とする．)

まず，0 番目の点を原点とし平行移動成分を除去する．

$$\begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}, \quad (n = 0 \sim 4) \quad (6.8)$$

0 番目の点を原点として得られた 3 次元モデルデータを

$$\begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

とする．同様に 0 番目の点を原点として得られた赤外線センサからのデータを

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

とする．剛体とみなせる HMD に取り付けられたマーカー位置の平行移動成分を除去したため，これら行列の間には以下の用に 3 次元回転の関係に示すことができる．

$$\begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

本手法では，回転行列であるという条件を用いなくて回転行列を算出する．このため，それぞれ独立に $(a, b, c), (d, e, f), (g, h, i)$ を算出することができる．よって，ここでは (a, b, c) の算出方法のみを示す．上式から (a, b, c) に関連する部分のみを抽出すると以下の式で示すことができる．

$$\begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

上式の展開を誤差があると考え変形すると以下のような正規方程式を求めることができる．

$$\begin{cases} X_1 - (x_1a + y_1b + z_1c) = \nu_1 \\ X_2 - (x_2a + y_2b + z_2c) = \nu_2 \\ X_3 - (x_3a + y_3b + z_3c) = \nu_3 \\ X_4 - (x_4a + y_4b + z_4c) = \nu_4 \end{cases}$$

上式における ν_n がそれぞれの式における残差である．これら ν_n の二乗和が最小となるように， a, b, c を求める．

$$\nu^2 = \nu_1^2 + \nu_2^2 + \nu_3^2 + \nu_4^2 \quad (6.13)$$

未知量 a, b, c の最も適切である値 (最確値) a_0, b_0, c_0 を求める連立方程式を以下のように求める . 変数 a, b, c を含んだ関数 ν^2 の 2 次微分の値は必ず正となる . また , a_0, b_0, c_0 で関数 ν^2 が最小値をとる . ここでは a_0 の式のみを記述する .

$$\frac{\partial \nu^2}{\partial a_0} = -2(x_1\nu_1 + x_2\nu_2 + x_3\nu_3 + x_4\nu_4) \quad (6.14)$$

$$\frac{\partial^2 \nu^2}{\partial a_0^2} = -2(x_1\nu_1 + x_2\nu_2 + x_3\nu_3 + x_4\nu_4) \quad (6.15)$$

他 b, c についても同様に行うと以下の式が成り立つ .

$$\begin{cases} x_1\nu_1 + x_2\nu_2 + x_3\nu_3 + x_4\nu_4 = 0 \\ y_1\nu_1 + y_2\nu_2 + y_3\nu_3 + y_4\nu_4 = 0 \\ z_1\nu_1 + z_2\nu_2 + z_3\nu_3 + z_4\nu_4 = 0 \end{cases}$$

上記式に各 ν_n の代入を行い変形した結果を行列で表すと以下のように a, b, c を求めることができる .

$$\begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i^4 x_i^2 & \sum_i^4 x_i y_i & \sum_i^4 z_i x_i \\ \sum_i^4 x_i y_i & \sum_i^4 y_i^2 & \sum_i^4 y_i z_i \\ \sum_i^4 z_i x_i & \sum_i^4 y_i z_i & \sum_i^4 z_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_i^4 x_i X_i \\ \sum_i^4 y_i Y_i \\ \sum_i^4 z_i Z_i \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

同様に , $(d, e, f), (g, h, i)$ も求めることができる . この時 , 逆行列を求めることができない条件も考える必要がある . 利用するマーカーが同一平面上にある場合 , 独立な 3 ベクトルを得ることができず , 逆行列を求めることができない . このため回転行列を算出することができなくなってしまう . これが上記の問題として述べた , 独立ベクトル不足問題の精度低下の理由である .

6.4 3 点法と 12 点法の精度比較

2 つの位置姿勢の算出手法にはそれぞれ特徴があり , 目的にあわせた適切な使い分けを行うことが望ましい . 3 点法は比較の実装が容易である . またマーカー間の距離を長くすると精度が向上する利点もある . しかし , HMD の位置姿勢算出を考慮した場合 , 3 点法では明らかにユーザの行動が妨げられてしまう . この問題を解決した 12 点法は処理が複雑で 3 点法にはない前述の問題が生じる . そこで , 両手法の位置姿勢精度を明かにするためにシミュレーション実験を行い , その精度と比較を行った結果を示す .

表 6.1: 最大精度

位置センサからの距離 [m]	2.25	4.00	6.00
計測視野 [m ²]	1.34 × 1.28	2.36 × 2.04	3.54 × 2.60
X 軸・Y 軸 精度 [mm]	0.1	0.3	0.45
Z 軸 精度 (奥行き) [mm]	0.15	0.45	0.9

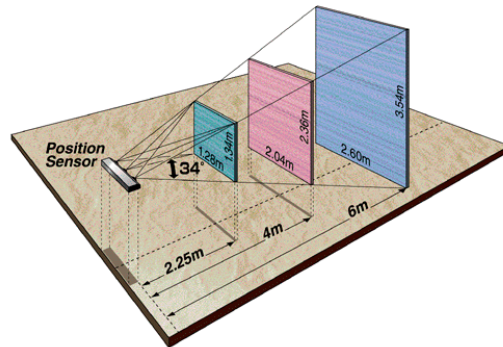


図 6.8: 計測視野

6.4.1 シミュレーション方法

両手法で算出される位置姿勢の精度をシミュレーションにより検証する．赤外線センサが計測するマーカー位置情報に存在する誤差を表 6.1 に，センサの計測視野を図 6.8 に示す．この表を参考にし誤差の大きさを定め，ランダム関数を利用することでシミュレーション実験におけるマーカー位置に含まれる誤差を再現する．実際のシステムでは赤外線センサからマーカーまでの距離は 4~6 [m] 程度である．今回のシミュレーションでは 6 [m] と仮定しそれに適切である誤差を位置情報に加えて実験を行った．この実験では，前述の誤差を含んだ 3 次元位置データから HMD の位置姿勢情報をそれぞれの手法により算出し，1 [m] 離れた仮想物体が，観察者から見てどの程度ぶれるかを調査した．

下記実験で使用する a_1 とは，図 6.4 の a_1 のことで，最初に軸を求める時に使用するマーカー間の距離を示す．

実験 1 3 点法の a_1 軸マーカー間の距離変化による仮想物体のぶれを調べる．実験環境の詳細は表 6.2 に示す．実験結果を図 6.9 に示す．

実験 2 12 点法のマーカー間の距離変化による仮想物体のぶれを調べる．ここでは実際のシステムでの位置ずれを調査したい．そこで実際にシステムで利用した 12 点のマーカーの位置情報を利用した．表 6.3 に実際の値を示す．この 12 点の位置データを 0 倍から 10 倍に変化させてシミュレーションを行った．1 倍の時が 12 点法の実際のシステムで予想されるぶれである．

表 6.2: 実験 1 の環境

1 番マーカーの位置 [mm]	(0.0, 0.0, 0.0)
2 番マーカーの位置 [mm]	(val , 0.0, 0.0) $val = 10.0 \sim 1000.0$
3 番マーカーの位置 [mm]	(0.0, 0.0, 100.0)
各マーカーにのる誤差 [mm]	(± 0.45 , ± 0.45 , ± 0.9)

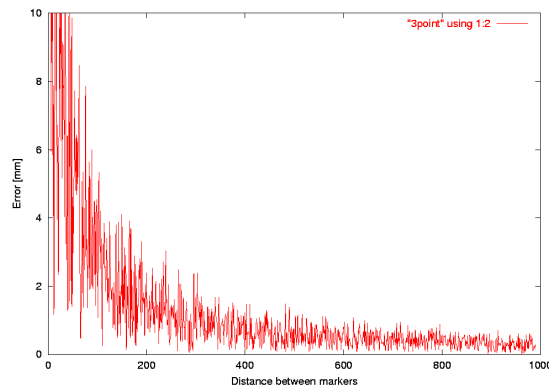


図 6.9: 3 点法の誤差 (X 軸 10 [mm] ~ 1000 [mm] , Y 軸 100 [mm])

6.4.2 結果と考察

a_1 のマーカー間の距離変化に対する仮想物体のぶれの大きさの変化を図 6.9 に示す。3 点法を HMD で利用する場合にはマーカー間の距離は 100 ~ 200[mm] 程度と予想される。マーカー間の距離が長くなるにつれてぶれが小さくなるのがわかる。

結果を、図 6.10 に示す。赤色のグラフは利用可能なマーカー数が 4 点の場合、緑色のグラフは利用可能なマーカー数が 8 点の場合を示す。12 点法は 3 点法と比べると多少誤差が多いように見受けられる。これは最小二乗法を利用した手法では、回転行列を算出する際に回転行列の直交条件などを利用せずに計算を行っていることが原因と思われる。しかしこの程度の誤差であればユーザの行動範囲を妨げない 12 点法の方が本システムには適切だと考える。

6.5 幾何学的整合性と時間的整合性

6.5.1 誤差を考慮した座標変換

座標変換の順序

赤外線センサは、磁気センサや ARToolKit[21] のような画像指標などと比較すれば非常に精度が高い。しかしながら、表 6.1 に示すように誤差が存在しないわけではない。この誤差

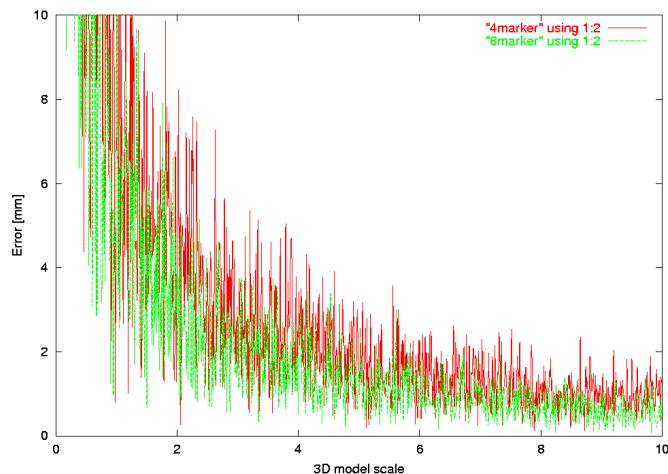


図 6.10: 12 点法の誤差

表 6.3: 12 点のマーカ位置情報

座標 \ マーカー番号	0	1	2	3	4	5
X 座標 [mm]	28.26	76.24	-128.33	44.21	-65.11	0.00
Y 座標 [mm]	197.30	42.00	132.19	28.31	198.26	0.00
Z 座標 [mm]	158.63	92.44	54.63	2.01	136.57	0.00
座標 \ マーカー番号	6	7	8	9	10	11
X 座標 [mm]	-61.13	10.23	-109.59	67.20	-132.66	-83.20
Y 座標 [mm]	-0.57	210.21	26.99	130.79	34.99	180.68
Z 座標 [mm]	1.40	112.89	6.73	49.70	94.30	177.52

を考慮した上で座標変換を行わなければ，誤差に誤差の上乗せをする結果を招く恐れがある．赤外線センサの精度を十分に活かした複合現実感のシステムを構築するには，計算値には誤差が含まれていることも考慮した上での座標変換が必要となる．座標変換の順序が誤差に及ぼす影響の例を図 6.11 に示す．ここでは，マーカ位置情報を利用してセンサ座標系をマーカ座標系に変換する例をあげて，座標変換の順番が全体的なシステムの精度に及ぼす影響について言及する．

誤差が存在しない理論上では，回転後に平行移動を行う座標変換の方法，図 6.11 の (a.1) と平行移動後に回転を行う座標変換の方法，図 6.11 の (b.1) の間では，途中の過程は異っているが最終的な結果には違いはない．しかしながら，実際のシステム上では，誤差が存在する．赤外線センサのマーカ位置情報に存在する誤差の大きさを表 6.1 に示す．マーカ位置情報に，この表に示される最大精度内での誤差が存在する場合について説明する．

まず，図 6.11 の (a.2) に示すように回転後に平行移動する場合について記す．まず，回転操作を行うと，マーカに存在する誤差のために理論値に誤差が加わった値となる．この後，誤

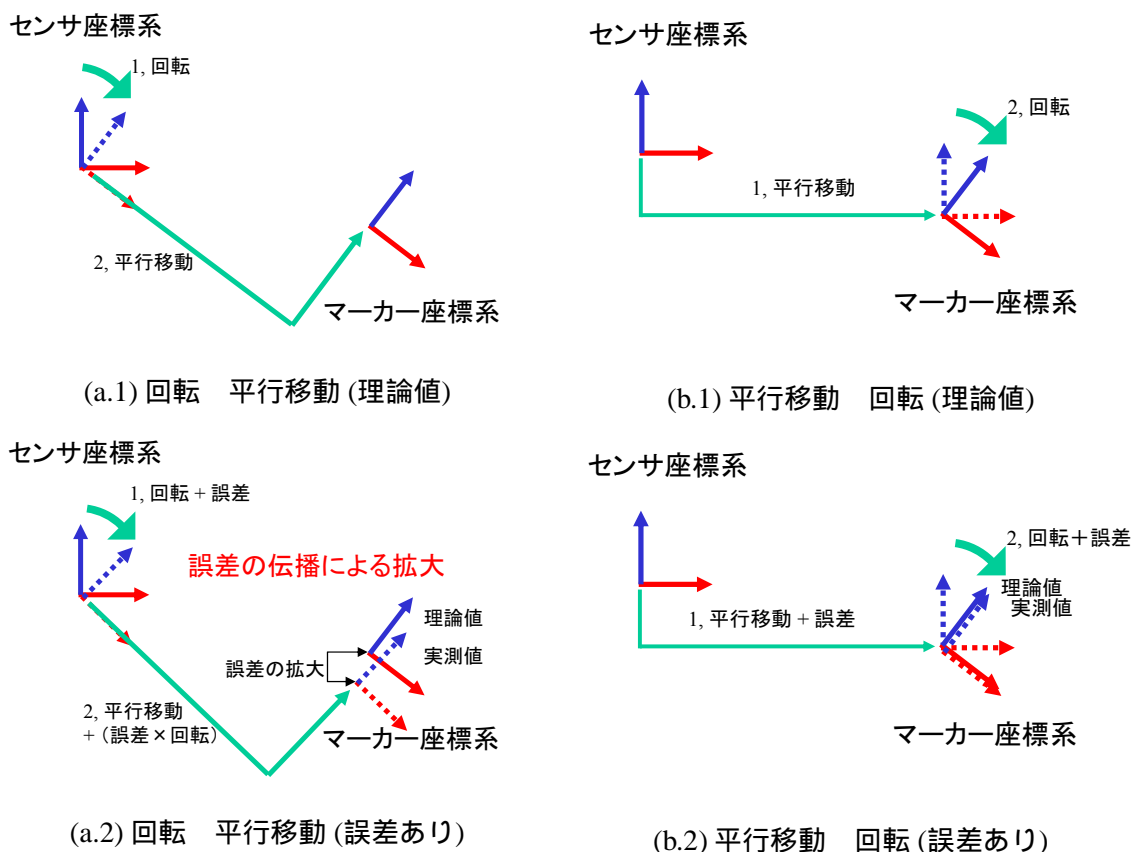


図 6.11: 誤差の伝播

差を含んで回転した座標系で、平行移動を行う。この平行移動成分は、センサ座標系における平行移動成分と誤差を含んだ回転行列の積となり、回転行列の誤差を平行移動成分で拡大することとなる。図 6.11 の (a.2) に示すように、最終的に算出されるマーカース座標系が理論値と実測値で大きな誤差を含む結果となる。

次に、図 6.11 の (b.2) に示すように平行移動後に回転する場合について記す。まず、センサ座標系において平行移動を行う。この場合の誤差は、センサの精度と全く同様である。また、その後の回転に関しても、平行移動成分との掛け算を行わないため、センサの精度のまま行われる。このように、理論値では全く同じ結果を出す座標変換であっても、誤差が含まれる場合には、その座標変換の順番が、最終的な精度へ大きく影響する。

図 6.11 の (a.2) と (b.2) を比較した場合、平行移動後に回転した場合と比べても、非常に大きな誤差を生み出す結果となる。センサの精度を活かした座標変換を行うためには誤差を含む回転行列に平行移動成分を掛けることがどのような意味をなすか良く考えてシステムを構築する必要がある。

本システムでは、被重畳者と観察者の間の平行移動成分は必ず、センサ座標系で取り扱う



図 6.12: 角度誤差 (理論値)

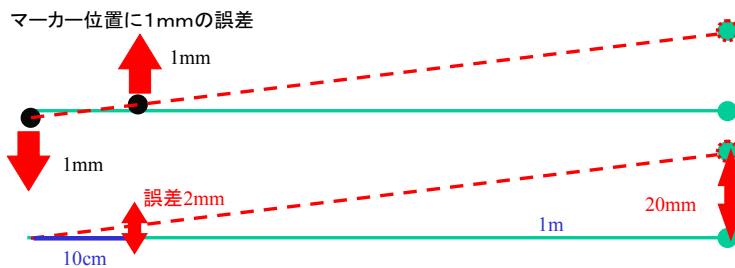


図 6.13: 角度誤差 (誤差あり)

ようにすることで、誤差の拡大を抑えた。また、全ての座標系がセンサのマーカで構成されているわけではないため、回転行列に平行移動成分を掛けることが避けられない場合もある。このような場合にも、座標系間の平行移動成分が小さくなるように座標系を定めることで、誤差の拡大を抑えたシステムの構築が可能である。

角度誤差の拡大

角度誤差が及ぼす影響について記す。まず、本システムにおいて起りうる角度誤差について考察する。赤外線センサのマーカ位置情報には、表 6.1 に示す範囲内で誤差が存在する。実際のシステムでは赤外線センサからマーカまでの距離は 4~6 [m] 程度である。赤外線センサからの距離 6 [m] の場合、 z 軸では 0.9 [mm] の精度が保証されている。そこで、マーカに 1 [mm] の誤差が生じた場合における誤差について考察することとする。ここでは議論を簡潔化するために 2 次元で議論を行う。距離 10 [cm] 離れた位置に置かれた 2 点のマーカを結ぶ延長線上 1 [m] 先を対象とし、ここに起りうる最大の位置ずれについて考察する。

まず、誤差の存在しない理論値の場合を図 6.12 に示す。次に、マーカに誤差の存在する場合を図 6.13 に示す。上下方向に誤差が 1 [mm] ある場合を仮定すると、これは一方のマーカのみならず誤差が 2 [mm] ある時の角度誤差と同じと考えてよい。この時の 2 点のマーカを結ぶ延長線上 1 [m] の位置では、マーカのずれが拡大して伝搬され 20 [mm] もの大きさになる。このようにマーカ 1 つの誤差は小さくとも、このマーカ位置情報を利用して算出された回転に含まれる誤差を考慮する必要がある。回転誤差による誤差の伝播の影響が大きいため、前述のような誤差を考慮した座標変換が、位置センサを利用したシステムには必要だと考えられる。

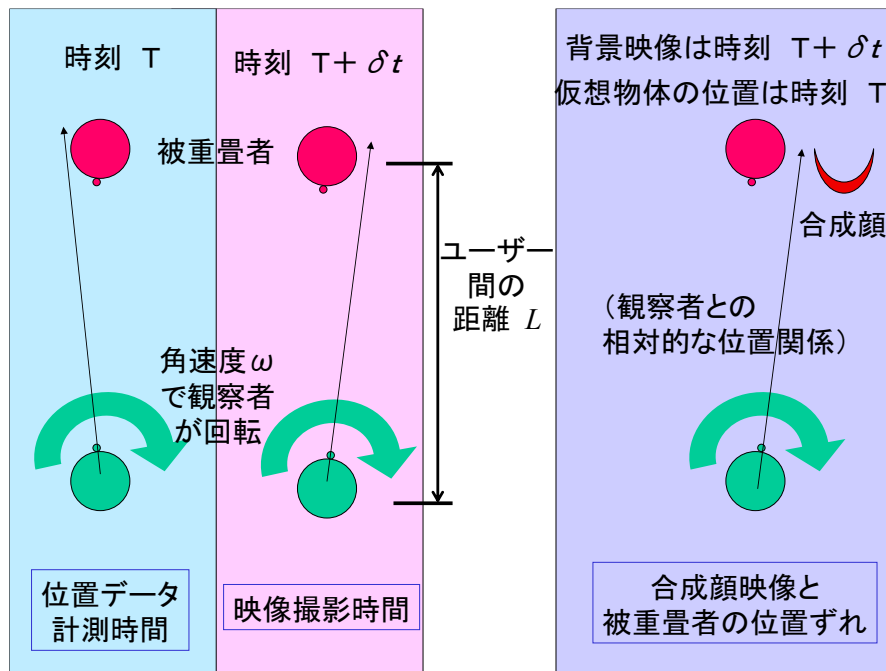


図 6.14: 時間差による位置ずれ

6.5.2 時間的整合性

3点法と12点法の精度比較実験で行った結果と実際のシステムを比較すると、実際のシステムでは明かに位置ずれが大きい。特に、観察者が静止状態の場合にはぶれが少ないが、観察者が動くと仮想物体や合成顔のぶれが目立つようになる。

これには2つの原因が考えられる。まず、ユーザーが動作することで先にあげたような12点法が持つ問題、例えば、マーカー切り替わり時のぶれや、オフセット問題、独立ベクトル不足などの問題が発生することである。もう一方は時間的不整合により生じる問題である。HMDのカメラで現実空間を撮影した時間と、赤外線センサでマーカーの位置を計測した時間の不一致が影響を及ぼしていると考えられる。このわずかな時間の不一致が複合現実空間の位置ずれに及ぼす影響について以下にその詳細を記す。

時間的不整合が位置ずれに及ぼす影響

本システムでは、位置計測時間が背景撮影時間と比べて1/30秒以下の範囲で遅延していることが確認された。この時間差が複合現実空間の仮想物体に及ぼす位置ずれについて考察する。位置ずれが最も大きく現れるのは、図6.14のような観察者があたりを見回すような時の回転動作である。観察者の平行移動においても時間的不整合による位置ずれが生じるが、その位置ずれは移動速度と遅延時間(1/30秒以下)の積であり、回転動作時の位置ずれと比較す

表 6.4: 時間差による位置ずれ ($L = 1000[mm]$)

角速度 ω \ データ獲得の時間差 δt	1/30 [sec]	1/60 [sec]	1/90 [sec]
$\pi/2$ [rad/s]	52.4 [mm]	26.2 [mm]	17.4 [mm]
π [rad/s]	105 [mm]	52.4 [mm]	34.9 [mm]

表 6.5: 時間差による位置ずれ ($L = 2000[mm]$)

角速度 ω \ データ獲得の時間差 δt	1/30 [sec]	1/60 [sec]	1/90 [sec]
$\pi/2$ [rad/s]	105 [mm]	52.4 [mm]	34.9 [mm]
π [rad/s]	209 [mm]	105 [mm]	69.8 [mm]

れば非常に小さなずれである．ここでは，回転動作時における位置ずれについて考察するものとする．

まず位置データ計測時間を T とする．この δt 秒後の $T + \delta t$ 秒に HMD カメラで現実空間が撮影される．この δt は非常に小さい値であるが，ユーザが回転動作をする場合には大きな位置ずれの原因となりうる．合成顔映像の位置は， T 秒の瞬間に計測された両者の位置関係を基に重畳される．しかし背景は $T + \delta t$ 秒の映像となり，時間遅延が生じてしまう．このため観察者へ提示される映像上では図 6.14 右に示すように現実世界の人物領域と合成顔画像の間には位置ずれが生じる．ユーザ間の距離を L ，観察者頭部の角速度を ω ，遅延時間を δt ，ずれ幅を δE とする．このずれ幅を求める計算を式 (6.17) に示す．

$$\delta E = L \times \omega \times \delta t \quad (6.17)$$

この回転動作時に起こる合成顔の位置ずれの大きさを表 6.4，6.5 に示す．本システムでは，1/30 秒以内の時間差があることが確認されているので，1/30, 1/60, 1/90 秒の遅延の 3 通りについて，位置ずれの大きさを算出した．頭の回転は視線方向を変える程度の 1 秒間に 90° の場合と素早く振り向くような 1 秒間に 180° の場合とについて考え，角速度 $\pi/2, \pi$ [rad/s] の 2 通りについて算出した．両ユーザ間の距離は，1000, 2000 [mm] の 2 通りについて算出した．1000 [mm] の場合の位置ずれを表 6.4 に，2000 [mm] の場合の位置ずれを表 6.5 に示す．位置ずれの大きさは距離に比例していることがわかる．また，ユーザの回転速度と位置ずれの大きさも比例関係であることがわかる．この表が示す位置ずれは，センサの精度と比較して非常に大きなずれであり，時間的不整合が位置ずれに及ぼす影響の大きさが確認できる．

本システムにおける時間的整合性

背景撮影時間と位置計測時間に 1/30 秒以下の差があることは確認された．センサの計測時間と背景撮影時間を同期することが理想的である．しかしながら，本システムを構成する機器では，センサとカメラの同期をとることが難しい．赤外線センサの計測自体が，時分割で 1 つずつのマーカを順々に計測している問題もある．つまり，システムで利用しているマー

カーの位置情報を計測してもそのマーカー 1 つ 1 つの計測時間が異ってしまうという問題がある。

しかし、本システムではできる限り時間の不整合が小さくなるように以下に示すような対策を行っている。

通信による遅延

従来は、赤外線センサで計測した位置情報を LAN 経由で通信していた。しかしながら、上記に示すようにわずかな時間遅れが位置ずれに及ぼす影響が大きいことが明らかになったため、通信による位置データの計測を控え、背景撮影、及びレンダリングを行う PC で直接センサからの位置情報を獲得した。これにより、時間遅延の問題が大幅に解消される。

プログラム上でのタイミング

毎フレームごとに背景撮影と位置情報の獲得を行う必要があるが、このタイミングをできる限り揃えることで遅延を解消できる。

処理の高速化

レンダリングのフレームレートを向上させることで、時間遅延の短縮が望めると考えられる。

マーカーの数

本システムで利用するマーカー数は 1 ユーザにつき 12 個とし、2 人のユーザが使うことを想定し計 24 個のマーカーを利用している。この場合、センサのサンプリング速度は 1200 [Hz] であるため、24 個のマーカーであれば $1200/24=50$ [Hz] でサンプリングすることとなる。マーカーの個数を増やすことでユーザ静止状態における位置姿勢は高精度で算出可能であるが、反対にシステムで利用する全マーカーを計測する時間が長くなり、全マーカーの計測レートが低下するという欠点がある。本システムではユーザ 2 人の共同作業を想定しているため、ユーザの行動範囲を妨げず、なおかつマーカー数を極力減らした計 24 点を計測する。なお、ユーザの行動に制限を加えられるような状況であれば、マーカー数の削減による計測レート向上が時間遅延を短縮させることも可能であると考えられる。

マーカーの配置

同時に計測するマーカーの計測順を考慮する。本システムでは、24 個のマーカーを利用しているため、センサ本体では 1 番から 24 番のマーカーを順に計測することとなる。例えば、ユーザが横向の場合に計測可能なマーカーが 1,2,3,4,5 番のように連番であれば、できる限り同時刻に計測されたマーカーを利用して回転行列を算出することになり、算出する回転行列の精度向上が望める。

このように時間遅延が及ぼす影響を考慮しながら、システムを構築することが必須となる。利用する PC の性能なども加わることになり、完全に時間的整合をとることは難しいと考えられる。しかしながら、赤外線 3 次元位置センサの精度を活かし完成度の高い複合現実感システムを構築するためには、上記に記すようなさまざまなことを考慮することが、最終的なシステムの完成度に強く影響すると考えられる。

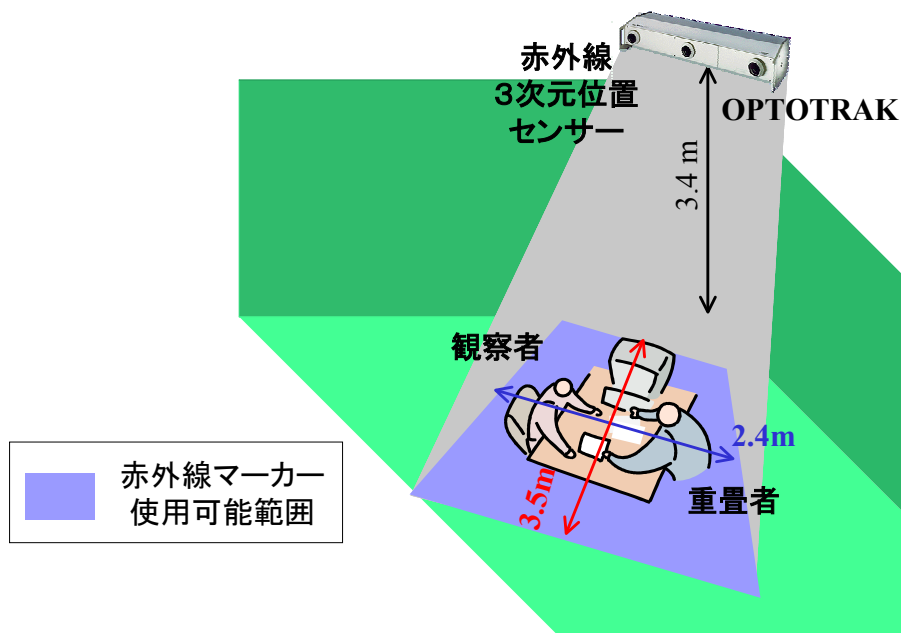


図 6.15: 実験環境

6.6 実験

HMD を装着したユーザの視線情報を視線検出機構により計測する．赤外線センサを利用して，観察者カメラからの被重畳者の HMD の領域を算出する．これらの情報から，被重畳者の視線情報を復元した顔映像を生成し，被重畳者の HMD 領域にこれを重畳した．

6.6.1 実験環境

図 6.15 に示すような環境において実験を行う．赤外線 3 次元位置センサは高さ約 3.4 m に設置し，斜め下方向を向いている．赤外線マーカの位置情報が得られる範囲の概略を図 6.15 に青色の台形領域で示す．本実験では，機材的な制限もあり，これまでに述べた理論を検証するため観察者からみた被重畳者の視線情報を復元するシステムの構築を行った．図 6.16 に，本実験システムの構成を示す．頭部の位置姿勢情報を算出するために，ユーザ毎に 12 点の赤外線マーカを配置する．赤外線センサは，1200 [Hz] で各マーカ位置情報を時間軸に独立に計測する．それぞれ 12 個のマーカを使用するユーザが 2 名のため，計 24 点の位置情報は 50 [Hz] で計測可能である．

次に，視線情報を獲得するための視線検出機構を被重畳者に利用する．この視線検出機構は，被重畳者の瞳孔中心を 50 [Hz] で算出可能である．これらの情報を顔映像レンダリング用の PC で受けとりリアルタイムで顔映像の生成を行った．

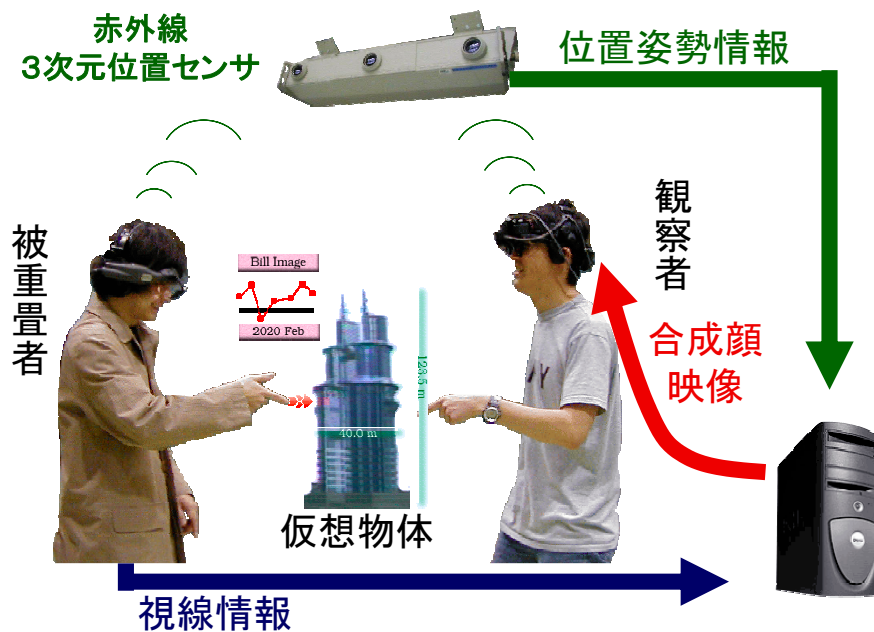


図 6.16: システム構成

6.6.2 実験結果

赤外線位置センサを使用し各ユーザ頭部の位置姿勢を算出した。また、視線検出機構を用いて被重畳者の視線情報の計測を行った。これらの情報を基に被重畳者の HMD 領域に、合成顔映像をリアルタイムで重畳することに成功した。図 6.17 に、3 方向からの顔画像を利用した顔映像生成手法を利用して視線情報を復元した様子を示す。図 6.17 左側（復元前）は、顔映像の重畳を行う前の HMD 装着時における被重畳者の顔映像である。視線情報を復元した映像の一部を図 6.17 右側に示す。正面、横向きともに合成顔映像が、被重畳者の HMD 領域を除去することに成功した。図 6.18 にスキャナーを利用した高精細顔映像生成手法による視線情報復元の様子を示す。

6.6.3 考察

図 6.17, 6.18 に示すように、被重畳者の HMD 領域に視線情報を復元した顔映像を重畳することができた。図 6.17 は、3 方向からの顔画像を利用した顔映像生成手法による視線情報の復元手法である。視線情報の再現は可能であるが、図 6.18 のスキャナーを利用した手法と比較すると、顔形状の歪みなどが気になり、異和感が残る合成顔映像であると考えられる。このような異和感の残った状態では、被重畳者から見られているという感覚にも乏しく、被視感の再現が不十分であると考えられる。それと比較し、スキャナーを利用した手法では、顔形状の歪みなどは、気にならない程度となり、合成顔映像から受ける異和感も格段に小さく、

被重畳者から見られているという被視感の再現も改善されていると考える。

しかし、現在のシステムは、現実世界とCGによって表現された仮想世界との光学的整合性がとれていない。このため重畳した合成顔映像と現実世界の間で、陰影やその顔色に不整合が生じているという問題も存在する。7章では本システムを利用して視線情報を復元した場合における視線情報復元の有効性についてその詳細を検証する。光学的整合性に関する問題に対しては、8章においてその詳細を検証する。



復元前 (正面)



復元後 (正面)



復元前 (横向き)



復元後 (横向き)

図 6.17: 協調型複合現実空間における視線情報の復元



図 6.18: 高精細顔映像の重畳による視線情報の復元

第7章 主観評価実験による有効性の検証

提案した方式によって再現された視線情報の協調型複合現実空間における有効性を主観評価実験により検証する。まず、距離や提示映像の違いによる視線認知精度への影響を調査する。次に、対面での共同作業を想定し、アイコンタクトを含めた視線認知精度を調査する。最後に、机を狭んで90°の位置に座り共同作業する場合を想定し、視覚的共同注意の精度を調査する。これらの視線認知精度を明らかにすることで、提案方式による視線情報復元の有効性が検証できると考えられる。

7.1 距離変化や提示映像の違いによる影響

7.1.1 視線認知実験

対面での共同作業を想定し、2人1組で視線認知実験を行う。実験環境を図7.1に、実際の評価実験の様子を図7.2に示す。一方のユーザの目の前に透明なアクリル板を置き、これに図7.3に示すようにマーカーを配置する。図7.1右に示すように、視線判断者側の目の前にアクリル板を置き、これにマーカーを配置する。実験中に両者の顔が動くと視線認知精度に影響がでるため、両者のあごを台の上に置いて頭部を固定する。このマーカーを注視するユーザをマーカー注視者とし、その視線を見て注視されたマーカーを回答するユーザを視線判断者と呼ぶ。

実験タスク

マーカー注視者は、実験指揮者によってランダムに指定されたマーカーを注視する。このとき視線判断者は、マーカー注視者がどのマーカーを注視しているかは知らされていない。視線判断者は、マーカー注視者の視線だけを見て、どのマーカーを注視しているのかを判断して回答する。

7.1.2 評価手法

現実空間における視線認知精度と、視線判断者のみがHMDを装着した場合の視線認知精度を比較することで、HMD装着による視線認知精度の影響を調査する。また、被験者間の距離を変化させた場合における、現実空間での視線認知精度と、HMD装着時の視線認知精度を

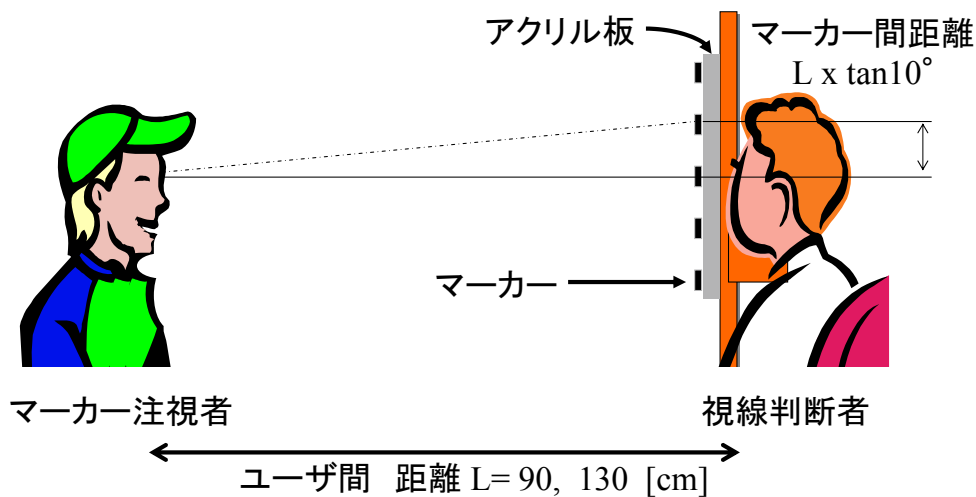


図 7.1: 評価実験環境

明らかにすることで、それぞれの状況に対し距離変化が視線認知精度へ及ぼす影響を明らかにする。

実験で利用する HMD は図 7.4 に示すような両目に別々の小型カメラと小型ディスプレイのあるビデオスルー HMD を利用する。図 7.5 に示すように、この HMD を利用した映像提示方法としては、右眼カメラの映像を両ディスプレイに表示する方法、左眼カメラの映像を両ディスプレイに表示する方法、ステレオ表示する方法、の 3 通りが考えられる。これら 3 通りにおける視線認知精度について調査することで、提示映像の違いによる視線認知精度への影響が確認できると考える。提案方式による視線情報復元の有効性を検証する前に、距離変化や提示映像の違いが視線認知精度に与える影響を明らかにする。

7.1.3 両者間の距離

共同作業を行う際に自然とある一定の距離を保って作業を行う場合が多い。これは鳥類や哺乳類がテリトリーを持つと同様に、人間も他者との間で距離を保つことに関して、ある程度の規則性を示すためと考えられている [33]。図 7.6(a) に示すように、この実験では同じ机を狭み対面で共同作業を行うような場合に保つ距離として短距離 90 [cm] を想定して実験を行った。図 7.6(b) に示すように、この距離は、心理学における個体距離に位置づけられる [33]。また、机を囲んで会議するような場合に保つ距離として長距離 130 [cm] を想定して実験を行った。この距離は、心理学における社会距離に位置づけられる。以下の実験では、ユーザ間の距離は短距離 90 [cm]、長距離 130 [cm] の 2 通りについて評価実験を行っている。

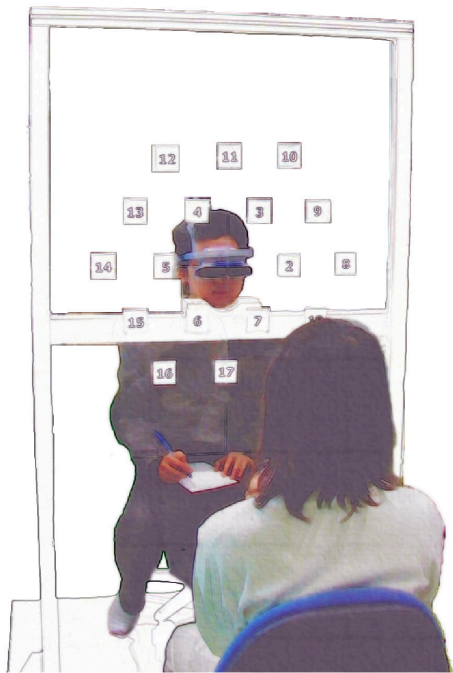


図 7.2: 評価実験風景

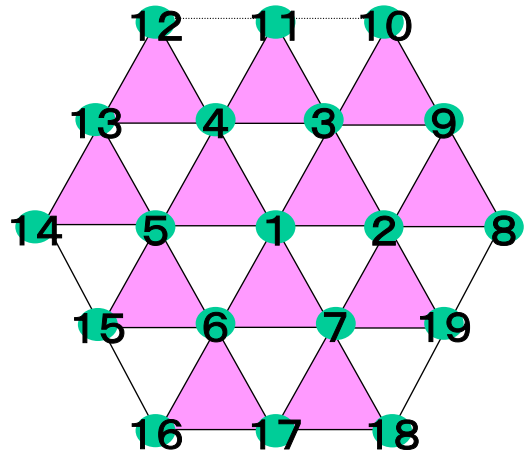


図 7.3: マーカー配置

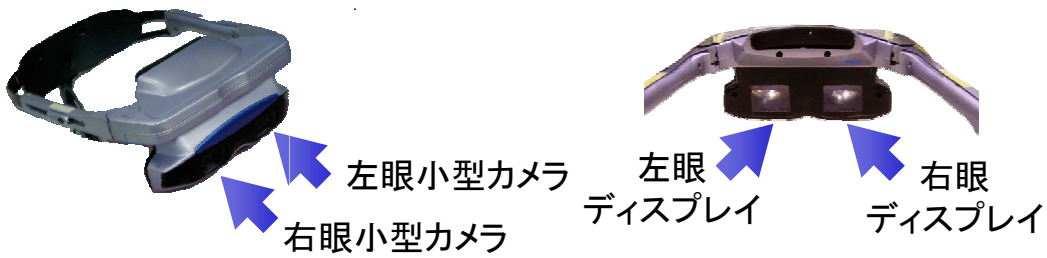


図 7.4: 実験に利用したビデオシースルー HMD

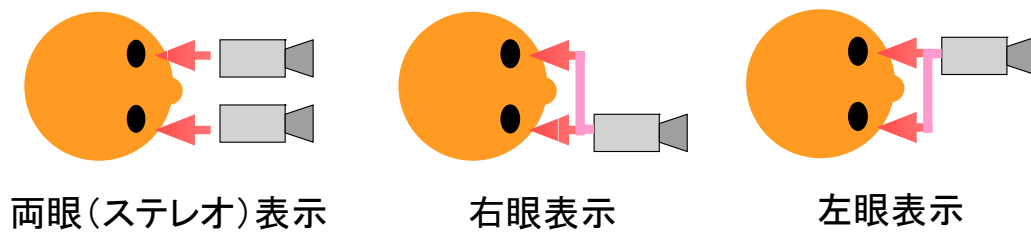
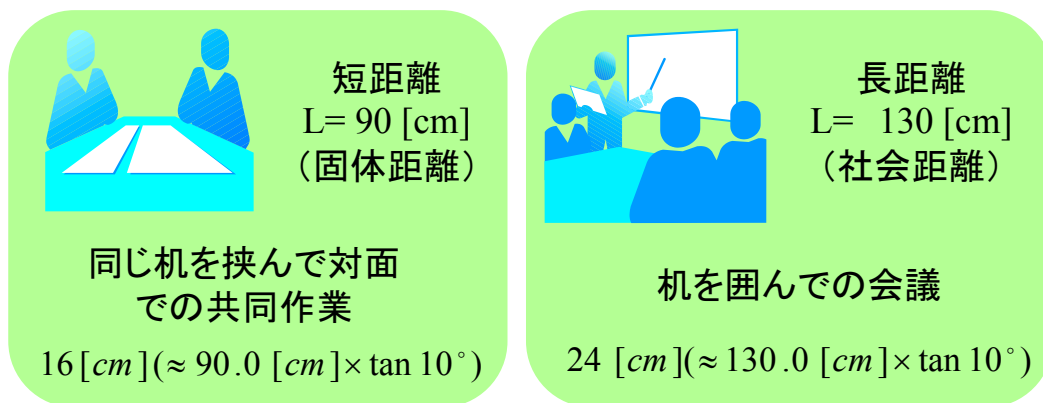


図 7.5: HMD への提示映像の違い



(a) 短距離

(b) 長距離

図 7.6: 共同作業中の距離

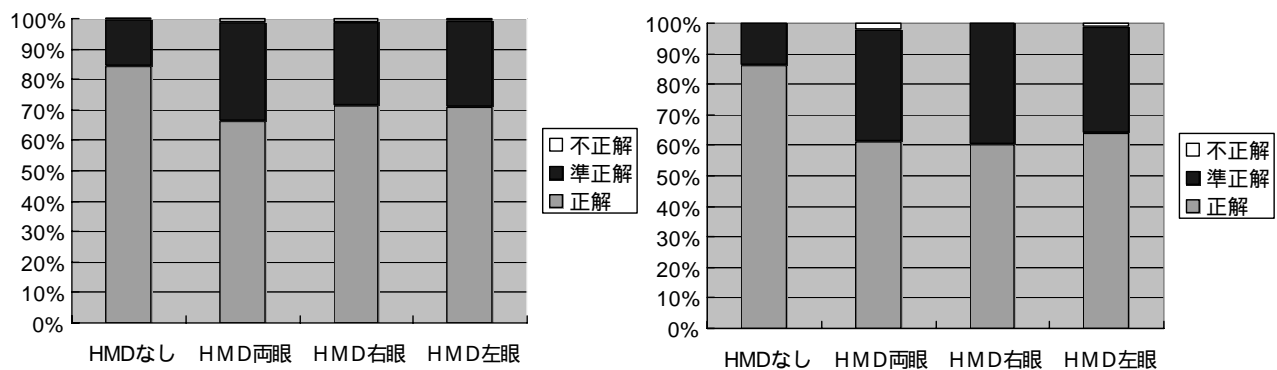


図 7.7: 短距離 (左), 長距離 (右) の視線認知精度

7.1.4 マーカー配置

評価実験に先だって予備実験を行った結果, 正解のマーカーに隣接するマーカーを誤って回答することが多いと分かった. このような場合を, 完全に誤りとせず精度評価に反映するために, 図 7.3 に示すように隣り合うマーカー同士の距離を等しくなるように配置し, 「正解」のマーカーの隣のマーカーを回答した場合には「準正解」として取り扱うことにした. 短距離, 長距離の評価実験では, それぞれ以下に示すマーカー間隔を採用した.

- 短距離 90 [cm] の場合
マーカー間隔 16 [cm] ($\approx 90 [cm] \times \tan 10^\circ$)
- 長距離 130 [cm] の場合
マーカー間隔 24 [cm] ($\approx 130 [cm] \times \tan 10^\circ$)

7.1.5 実験結果と考察

実験は、HMD を装着しない場合、HMD の右眼カメラの映像を左右両眼に提示した場合、HMD の左眼カメラの映像を左右両眼に提示した場合、右眼・左眼カメラの映像をそれぞれの眼に提示(すなわち、ステレオ表示)した場合について、それぞれ短距離 90 [cm] と長距離 130 [cm] についての視線認知精度を主観評価実験により調査した。

視線判断者の被験者は矯正視力 0.7 以上を対象とし、左右の視力差が著しい者は被験者から除外した。被験者 12 人で、それぞれの実験を行った。実験結果を図 7.7 に示す。

HMD を装着することによる影響

ボンフェローニの多重比較法 [34], [35] により、短距離の場合の 4 項目と長距離の場合の 4 項目について、それぞれ有意差があるかどうか検定を行った。短距離、長距離のいずれの場合にも HMD 非装着時は有意水準 5 % において有意差が認められた。HMD を装着しない場合と比較し、ビデオシースルー HMD 越しに見る相手の視線は見づらくなることが視線認知精度の低下の要因になったのではないかと考えられる。本実験で用いた HMD(COASTAR) の性能を、付録の表 9.3 に示す。COASTAR は 640 x 480 [pix] の解像度であり、解像度の低さが要因の一つとして考えられる。より解像度の高い HMD を使用することで、視線認知精度を高めることは可能であると考えられるが、裸眼と同等の視線認知精度を得ることは難しいと考えられる。また、カメラやディスプレイのダイナミックレンジの狭さも原因であると考えられる。特に、下向き視線のためにまぶたを半分閉じているような場合には、眼球に落ちる影が眼球全体を暗くし、ビデオシースルー HMD 越しに見る相手の視線方向が判断しづらいこともあった。

距離変化にともなう影響

t 検定により、映像提示方法 4 種類それぞれについて、短距離と長距離の場合における正解率に有意差があるかどうか検定を行った。HMD を装着しない場合には、短距離と長距離において有意水準 5 % で有意差が認められなかった。両者間の距離に応じてマーカー間の距離を大きくし、隣接マーカーを見込む角度が等しくなるようにしているため、当然の結果といえる。

しかしながら、HMD を装着した場合の 3 通り (HMD 両眼, HMD 右眼, HMD 左眼) については有意差が認められた。HMD を装着した場合には、距離が大きいほどマーカー注視者の顔が HMD のディスプレイ上で小さく表示される。このため HMD の解像度の影響を受け、ユーザ間の距離が大きい場合に HMD 装着時の視線認知精度が低下したと考えられる。

映像提示の違いによる影響

ボンフェローニの多重比較法により、短距離の場合の 4 項目と長距離の場合の 4 項目について、それぞれ有意差があるかどうか検定を行った。HMD の提示映像の違う 3 通りの手法間

で視線認知精度に有意差は認められなかった。ステレオ表示の方が精度が高いと予想されたが、むしろ、ステレオ表示の場合には、わずかに精度が低いという結果になった。本実験で用いたのは固定焦点ステレオ表示の HMD であり、両眼の焦点調節と輻輳に矛盾が生じる [36]。焦点調節機能を持たない HMD を使用した結果、この矛盾が原因となり視線認知精度が低下した可能性も要因として考えられる。

7.2 対面時における視線情報復元の有効性の検証

7.2.1 視線認知実験

前節での視線認知実験と同じく、対面での共同作業を想定し、2人1組で視線認知実験を行う。実験環境や実験タスクも前節と同様とする。視線情報復元時の視線認知精度を調べ、これを比較することで有効性の検証を行う。

7.2.2 評価手法

3つの条件における視線認知精度を実験により調べ、この視線認知精度を比較することで、提案した視線情報復元方式の有効性を検証する。以下に、その3条件 (a), (b), (c) を示し、図 7.8 にこの条件を図式としてまとめた。

- (a) 現実空間を想定し、両ユーザが共に HMD を装着しない状況での視線認知精度
- (b) HMD を装着しないマーカー注視者の視線を、HMD を通して視線判断した視線認知精度
- (c) 提案手法によってマーカー注視者の視線を復元した場合の視線認知精度

(a) は精度比較の基準として利用する。ただし本研究では、複合現実感技術により、複数のユーザが現実空間中に提示された仮想物体を共有しながら共同作業する状況で、現実世界と同様に視線情報によるコミュニケーションを可能とすることを目的としている。従って、複合現実感を活用できない裸眼状態での視線認知精度と、本研究で実現された視線認知精度を直接比較することは、必ずしも適切ではない。このため、提案した方式による視線情報の再現が理想的に行われた場合として (b) を設定した。(a) と (b) の比較によって、我々が使用した HMD を通して視線認知した場合の視線認知精度の限界が明らかになると考えられる。(b) と (c) の比較によって、我々が実装した視線情報復元システムの完成度が評価できると考えられる。

7.2.3 実験結果と考察

被験者は矯正視力 0.7 以上を対象とし、被験者 10 人でそれぞれの実験を行った。被験者間の距離は、90 [cm] とする。顔の向きが視線認知精度に影響を及ぼすため、本実験では両者が

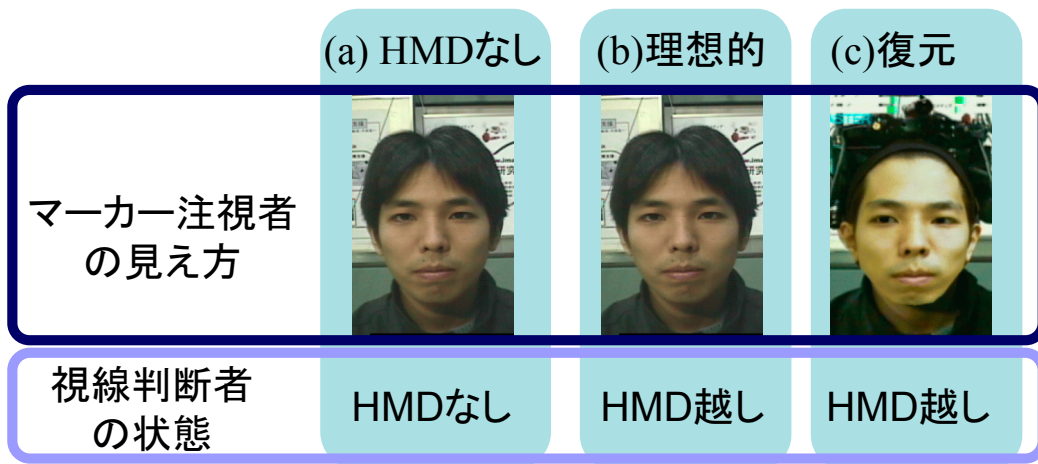


図 7.8: 視線認知実験を行う 3 条件

対面である状況を想定し，両者のあごを固定して実験を行った．視線判断者が，正解に隣接するマーカーを回答した場合は，準正解として取り扱う．実験結果を図 7.9 に示す．

(a)HMD なし vs. (b) 理想的

ボンフェローニの多重比較法により検定を行った．人間の直視と HMD の映像の正解率を比較した場合，有意水準 5 % で有意差が認められた．実験に利用した HMD の解像度不足，焦点固定，輻輳矛盾，低ダイナミックレンジなどが原因で HMD 越しの視線認知精度が低下したと考えられる．より高解像度で，輻輳調整が可能な HMD[36] を利用することにより視線認知精度は向上すると考えられる．

(b) 理想的 vs. (c) 復元

同様にボンフェローニの多重比較法により検定を行った．理想的に視線再現を行った場合と比較して，本システムにより視線再現を行った場合の正解率には有意水準 5 % で有意差が認められた．正解率低下の原因としては，合成顔映像の歪み，合成視線のずれ，ユーザ頭部と HMD のずれ，など，様々な要因が影響していると考えられる．ただし，有意水準 1 % では，有意差が認められなかった．有意水準 1 % でも有意差が認められた (a)HMD なしと (b) 理想的の場合と比較すれば，視線認知精度の低下自体は小さなものだと考えられる．

本システムを用いて視線再現を行った場合の視線認知精度は 60 % 弱の正解率となっている．理想的に視線の再現が出来たと仮定した状況での視線認知精度が 70 % 弱であることを考えると，多少の精度低下は認められるものの実装したシステムによる視線の再現は十分な効果を上げているといえよう．検定結果を考慮しても，有意水準 1 % で有意差は認められなかったため，理想的な場合にかなり近い水準で視線が再現されていると考えられる．また，準正解

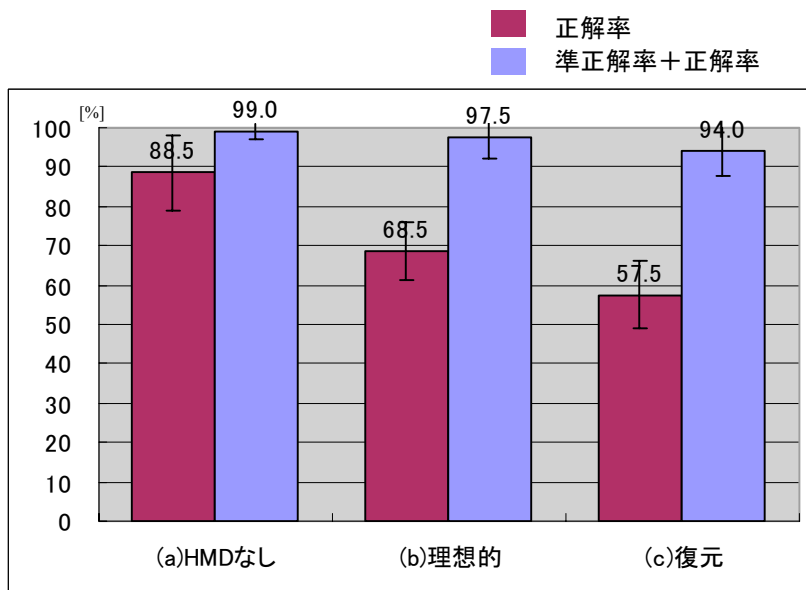


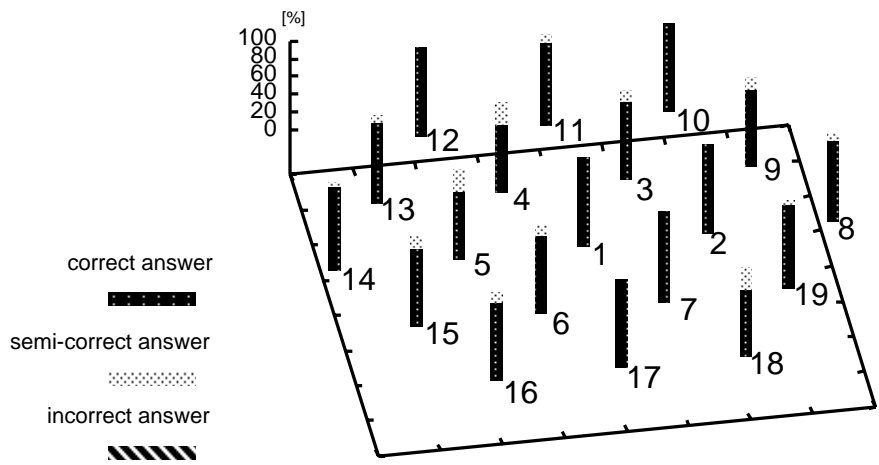
図 7.9: 視線認知精度

率を含めた正解率が 90 % を超えており、視線情報を伝達するという目的に対して、提案方式は十分に機能していると考えてよい。

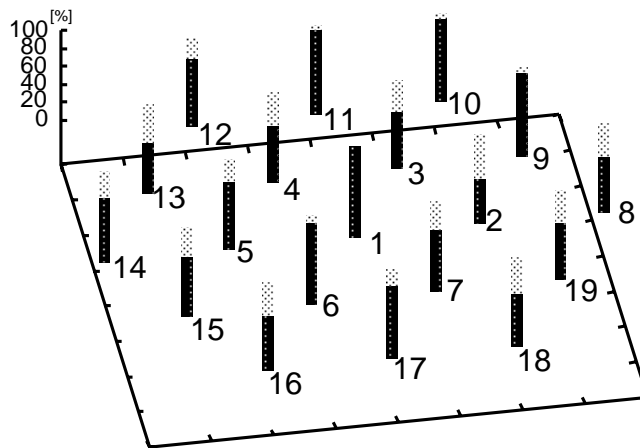
7.2.4 マーカー別の正解率の結果と考察

視線認知実験の結果をマーカー別にまとめた結果を図 7.10 に示す。視線情報を復元した (c) の場合には、上部に配置したマーカーの視線認知精度の低さが認められた。上部のマーカーを注視することによって大きく開くまぶたを、眼を閉じた顔と眼を普通に開いた顔の外挿により表現したことによる歪みが原因と考えられる。また、中心付近のマーカーの正解率が低い傾向が認められた。現状のシステムでは、まぶたの動きと視線以外の表情を持たない合成顔映像を顔全体に重畳している。このため、アイコンタクトをとった際の視線やまぶた以外のリアクションが伝わらないことも一つの要因であると考えられる。これは、眼球の周囲以外を包帯で隠した状態では、通常状態よりも視線認知精度が低下するという Loadら [37] の報告からも確認できる。人間が視線を認知する際には、眼球の移動情報のみでなく、まぶたや顔の形状、リアクションなど、さまざまな要素を手がかりとしているものと思われる。

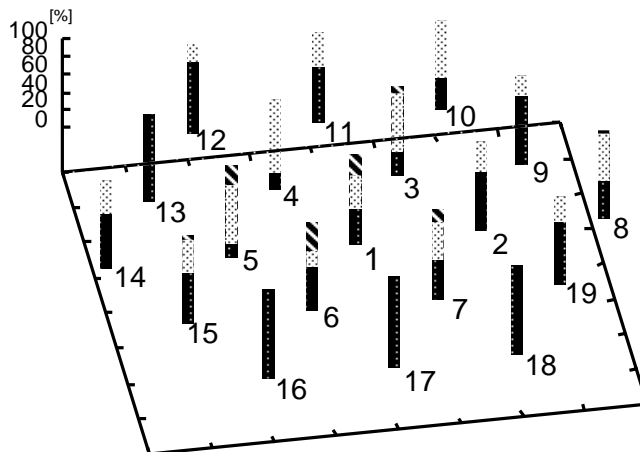
一方で、合成顔映像は照明による陰影の影響を受けないため、視線認知がかえって容易であるとの感想もあった。現実世界では、下向き視線の場合には、まぶたやまつげによる影がおちて眼球が暗くて見えづらくなる。本システムで視線の再現を行った場合には、このような影響を受けずに視線の判断を行うことができるためと考えられる。



(a)HMD なし



(b) 理想的



(c) 復元

図 7.10: マーカー別の正解率

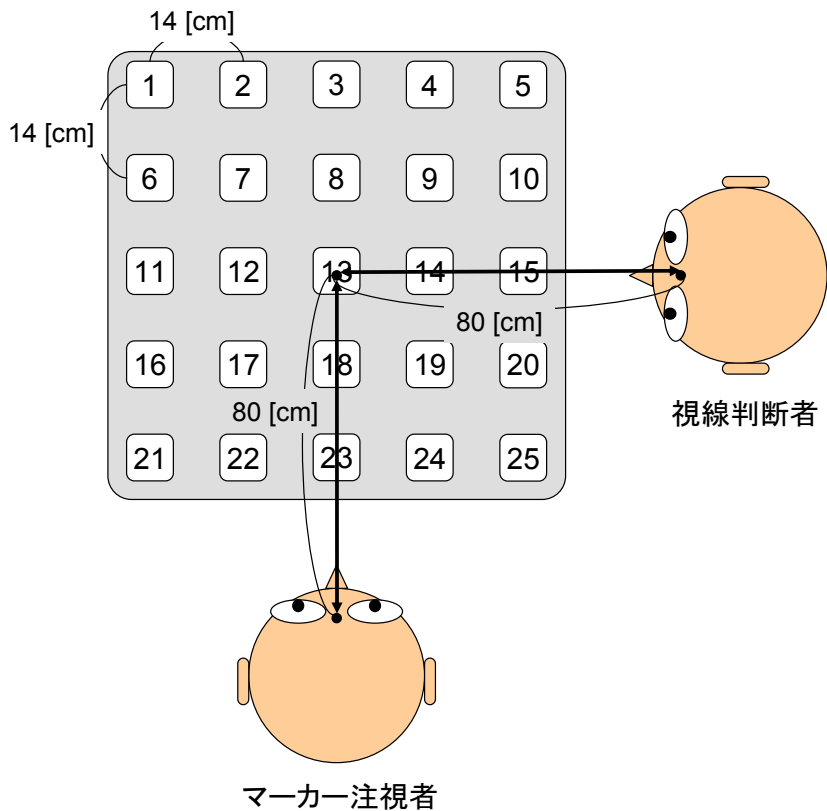


図 7.11: 評価実験環境：上

7.3 視覚的共同注意の有効性の検証

7.3.1 視線認知実験

図 7.11, 7.12 に示すように, 机を狭んで 90° の位置での共同作業を想定し, 2 人 1 組で視線認知実験を行う。実際の評価実験の様子を図 7.13 に示す。共同作業中にユーザが机上にある物体を注視するような場合を想定し, 図 7.11 に示すように机上にマーカー 25 個を均等に配置する。これまでの評価実験と同様に, マーカーを注視するユーザをマーカー注視者とし, その視線を見て注視されたマーカーを回答するユーザを視線判断者と呼ぶ。

実験タスク

マーカーが机上へ並べられたこと以外は, 前節と同じように評価実験を行う。前節と同じように, マーカー注視者は, 実験指揮者によってランダムに指定されたマーカーを注視する。このとき視線判断者は, マーカー注視者がどのマーカーを注視しているかは知らされていない。視線判断者は, マーカー注視者の視線だけを見て, どのマーカーを注視しているのかを

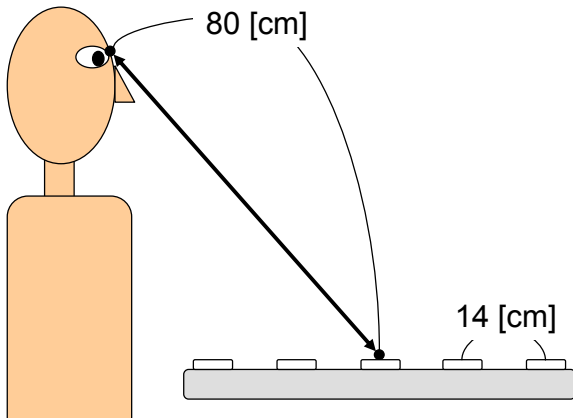


図 7.12: 評価実験環境：横

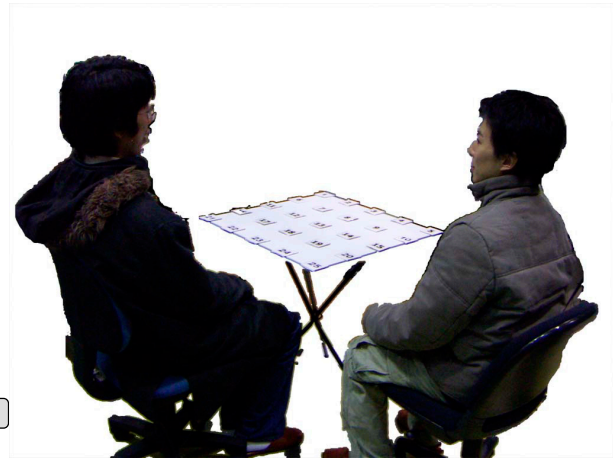


図 7.13: 評価実験風景

判断して回答する。

7.3.2 評価手法

対面時における視線認知実験と同じように 3 つの条件における視覚的共同注意の精度を実験により調べ、この精度を比較することで、提案した視線情報復元方式による視覚的共同注意の再現の有効性を検証する。以下に、その 3 条件 (a), (b), (c) を示す。

- (a) 現実空間を想定し、両ユーザが共に HMD を装着しない状況での視覚的共同注意の精度
- (b) HMD を装着しないマーカー注視者の視線を、HMD を通して視線判断した視覚的共同注意の精度
- (c) 提案手法によってマーカー注視者の視線を復元した場合における視覚的共同注意の精度

(a) は精度比較の基準として利用する。ただし本研究では、複合現実感技術により、複数のユーザが現実空間中に提示された仮想物体を共有しながら共同作業する状況で、現実世界と同様に視線情報によるコミュニケーションを可能とすることを目的としている。従って、複合現実感を活用できない裸眼状態での視覚的共同注意の精度と、本研究で実現された視覚的共同注意の精度を直接比較することは、必ずしも適切ではない。このため、提案した方式による視線の再現が理想的に行われた場合として (b) を設定した。(a) と (b) の比較によって、我々が使用した HMD を通して視覚的共同注意を認知した場合の精度の限界が明らかになると考えられる。(b) と (c) の比較によって、我々が実装した視線情報復元システムによる視覚的共同注意の再現の完成度が評価できると考えられる。

7.3.3 実験結果と考察

被験者は矯正視力 0.7 以上を対象とし，被験者 12 人でそれぞれの実験を行った．視線判断者が，正解マーカーの 8 近傍で隣接するマーカーを回答した場合は，準正解として取り扱う．実験結果を図 7.14 に示す．

(a)HMD なし vs. (b) 理想的

ボンフェローニの多重比較法により検定を行った．人間の直視と HMD の映像における正解率には有意水準 5 % で有意差が認められた．実験に利用した HMD の解像度不足，焦点固定，輻輳矛盾，低ダイナミックレンジなどの原因による精度低下と考えられる．また，HMD を装着すると，慣れない眼鏡越しに見ているかのように遠近感が取りづらくなり視覚的共同注意を判断しづらいつの感想も寄せられた．

また，予備実験において視線判断者に回答の正否を伝えながら実験を行ったところ学習効果により正解率の明らかな上昇が見られた．本実験では，実験中にこのような学習効果が起こらないように，(a),(b),(c) 全ての状況において回答の正否は伝えていない．しかしながら，HMD なしの状況とは，実験環境で視覚的共同注意の学習をするわけではないとしても，これまでの生活においてすでに視覚的共同注意を学習しているとも考えることができる．(a)HMD なしの状況における精度の高さは，このような日常生活における視覚的共同注意の学習効果も含まれているのではないかと考えることもできる．

(b) 理想的 vs. (c) 復元

図 7.14 に示すように，理想的に視線再現を行った場合と本システムにより視線再現を行った場合に視覚的共同注意の精度に有意差は認められなかった．実装したシステムによる視覚的共同注意の再現が十分な効果を上げている．

視覚的共同注意はもともと現実空間でもそれほど精度が高くないため，本システムによる視線情報の復元によりほぼ理想に近い状況で復元されていると考えられる．本システムによる視線情報の復元は，アイコンタクトには有効性が認められたものの，現実と同程度の精度には未だ不十分とされた．しかしながら，視覚的共同注意の再現という側面だけをみれば，理想的に視線が再現されたと仮定した場合に遜色無い精度である．

7.3.4 マーカー別の正解率の結果と考察

上記の実験の結果をマーカー別の正解率でまとめた結果を図 7.15，7.16，7.17 に示す．これを更にマーカーの配置場所を考慮し，3 次元的に表示したグラフを図 7.18，7.19，7.20 に示す．

前節での対面時の実験と同じように HMD 装着時には，明らかに不正解率が上昇している．HMD の解像度，ダイナミックレンジに問題があり，相手の視線が見えづらくなったためと考えられる．また，図 7.18，7.19，7.20 の 3 通り全ての場合において，外側と内側のマーカー

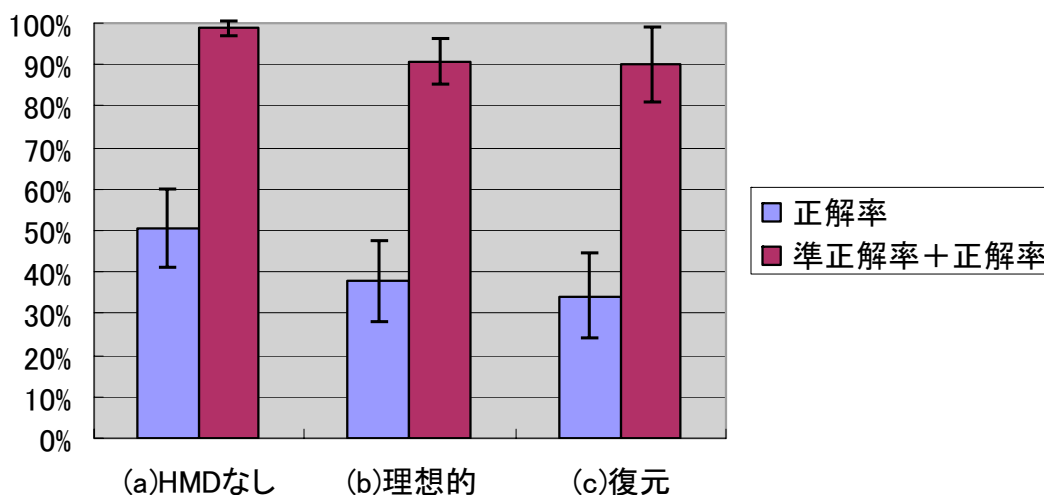


図 7.14: 視覚的共同注意の精度

の正解率を比較すると内側の正解率が低く、外側の正解率が高いことが確認できる。これは注視者が外側のマーカーを注視した場合、視線判断者は外側のマーカーよりも外側を見ていることはないと考えて回答するために正解率が必然的に高くなったと考えられる。

対面時の視線認知精度で、このような正解率の上昇があまり確認できなかった。対面時の視線認知精度は、正面視線 $\pm 5^\circ$ 付近が最も正確で、中心から離れる周囲に行くほど精度低下する傾向があることが真覚ら [38] や立野ら [63] の研究により報告されている。このため外側に配置されたことによる精度向上と、対面時において外側のマーカーを注視したことによる精度低下が打ち消しあっているため、このような傾向が見られなかったと考えられる。

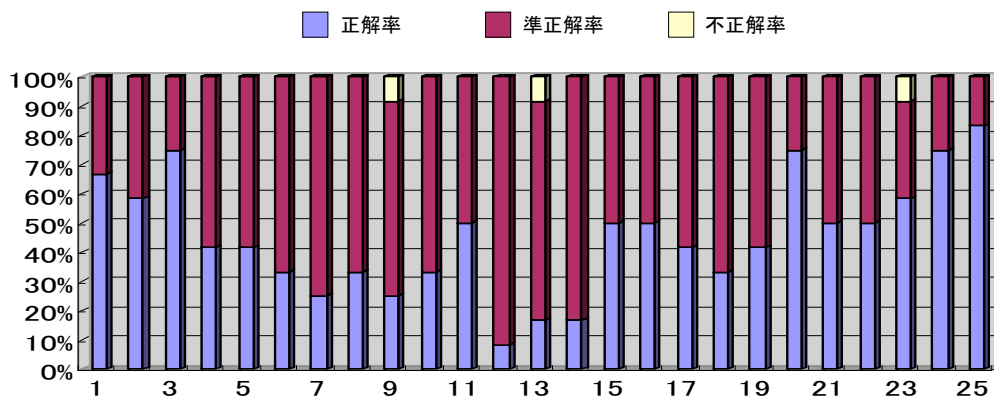


図 7.15: マーカー別視覚的共同注意の精度 (HMD 非装着時)

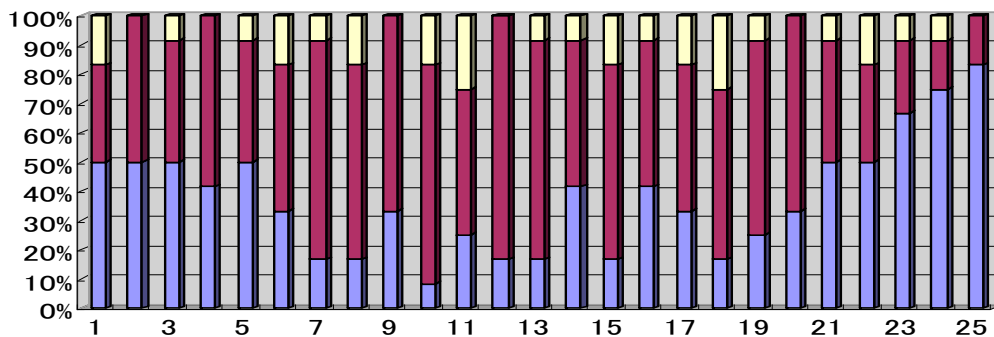


図 7.16: マーカー別視覚的共同注意の精度 (HMD 装着時)

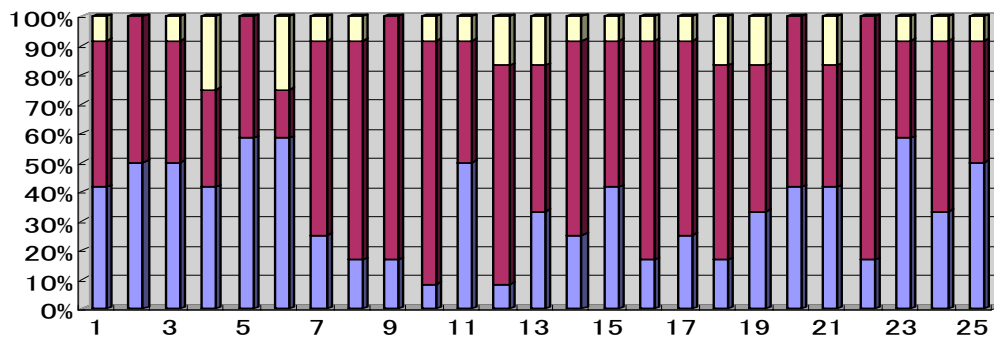


図 7.17: マーカー別視覚的共同注意の精度 (視線復元時)

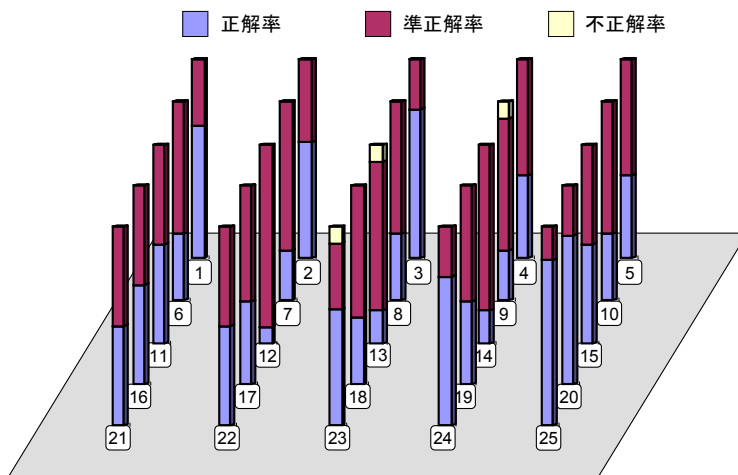


図 7.18: マーカー別視覚的共同注意の精度 (HMD 非装着時)

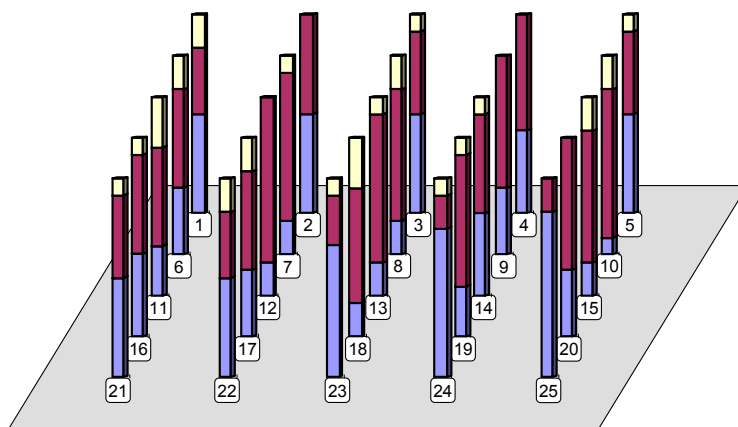


図 7.19: マーカー別視覚的共同注意の精度 (HMD 装着時)

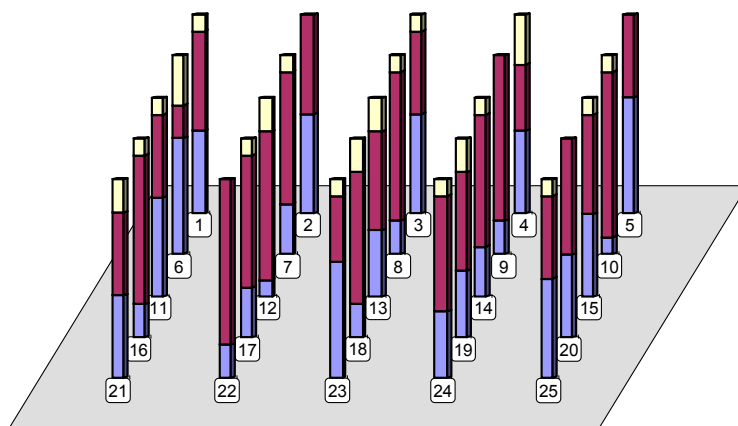


図 7.20: マーカー別視覚的共同注意の精度 (視線復元時)

第8章 光学的不整合による異和感の解消

8.1 光学的不整合がユーザに与える影響

8.1.1 光学的不整合がコミュニケーションに与える影響

協調型複合現実空間において、視線情報を復元した顔映像を重畳することが可能となった。前章までの手法で顔映像を相手のHMD領域のみに重畳した場合、図8.1上段に示すように顔上下部において明らかな光学的不整合が生じ大きな違和感を生じる問題があった。このため、前述までの実験では、合成顔映像を顔全体に重畳することで、光学的不整合による違和感を軽減していた。図8.1中段に示すように、顔上下部における光学的不整合がなくなるため、全体の印象としては光学的不整合が目立たなくなり、違和感が軽減された。しかしながら、図8.2に示すように異なるカメラによって撮影されたことなどによる光学的不整合が解決されていないため重畳された顔画像があたかもお面であるかのような印象を受けるだけでなく、顔下部の口の動きを隠してしまうという欠点もあった。

本来の目的を考慮すればHMD装着によって失われた視線情報を復元するためには、HMD領域にのみ合成顔映像を重畳し、口の動きなどは現実のままの映像をそのまま提示することが望ましい。本節では、光学的不整合により明らかに顔映像が合成であるとわかる違和感が、コミュニケーションに悪影響を与えるのではないかと考える。

例えば、一般的に顔の再認成績は、下方向よりも上方向からの照明条件の方が良いとされる[39]。日常生活において照明は上部に取り付けられていることが一般的であり、上から照明があたっている顔を見慣れている影響と考えられる。また、顔パターンは倒立すると、人物の同定や表情認知が著しく妨げられることが知られている[40][41][42]。人物の顔をさかさまのまま認識するようなことは、まれであることが影響していると考えられる。このような研究結果は、日常生活で良く見る状態、状況の顔に対しては異和感が少く、人物同定や表情認知などを容易に行えることを示している。より円滑なコミュニケーションを可能とするためには、より現実に近い状態の顔映像を提示することが重要であると考えられる。視線情報を復元した合成顔映像の光学的不整合を解決することで、異和感の軽減と被視感を再現することで、複合現実空間におけるコミュニケーションを更に円滑にすることが可能であると考えられる。本章では、HMD領域にのみ顔映像を重畳した場合における光学的不整合に着目し、その色合いと陰影の不整合が、ユーザに与える異和感とその許容範囲を主観評価実験により調査する。この調査した許容範囲を光学的不整合を補正する際の指標とし、異和感の軽減と被視感の再現を試みる。



- 顔上下部における光学的不整合
- 明らかな違和感
- 光学的不整合による違和感 大**



- 顔全体を重畳
- 光学的不整合による違和感 軽減**
- 口の動きなど隠す



- 顔映像の光学的不整合を解決
- HMD領域にのみ重畳
- 光学的不整合による違和感 解消**
- 口の動きをありのまま提示

図 8.1: 光学的不整合による異和感

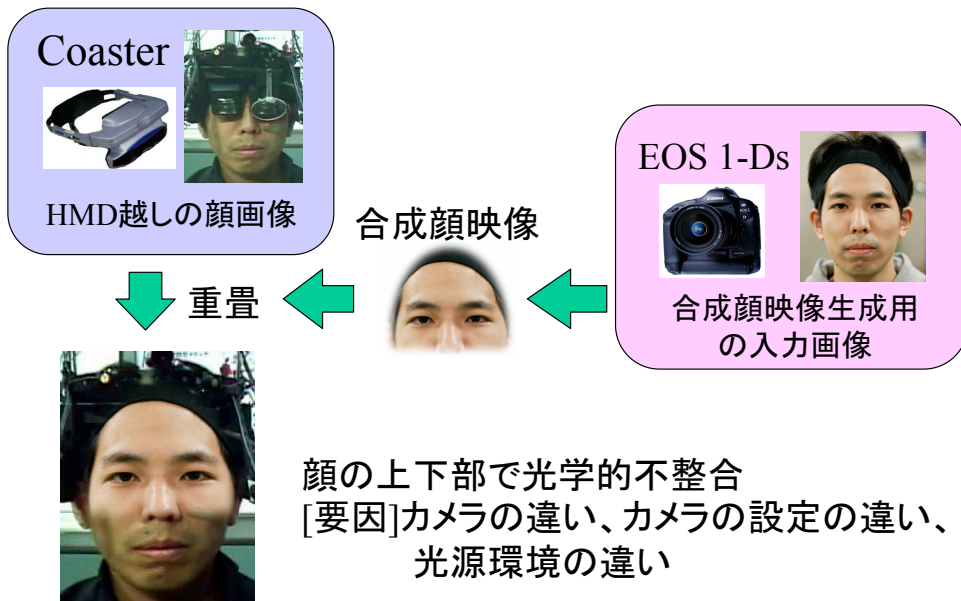


図 8.2: 光学的不整合

8.1.2 関連研究

光学的不整合がユーザに及ぼす影響を取り扱った研究例としては、菅野 [43] らの研究がある。菅野らは、陰影の存在が物体の存在感を強くし、位置関係の知覚の手がかりの1つとなることを評価実験の結果より明らかにした。このような結果からも、複合現実において光学的不整合の問題が解決されるべきであることが確認できる。また、光学的整合を追及した研究例として、佐藤ら [44] は、物体が落すキャストシャドウ内の明るさを分析することで輝度分布を推定し、求めた輝度分布を基に違和感のない陰影を持った仮想物体を重畳することに成功した。また、神原ら [45] は、鏡面球を ARToolkit[21] のマーカー上に取り付けることでリアルタイムで大まかに光源環境を推定し、仮想物体に反映することを可能にした。また、Agusantoら [46] は、Debevecら [47] が開発した「HDRShop」[48] を利用して周囲の光源環境をあらかじめハイダイナミックレンジで計測し、phong の BRDF モデルを適用する [49] ことで仮想物体の陰影をリアルタイムレンダリングすることに成功した。

このように、光学的整合に関するさまざまな研究が存在する。しかしながら、色合いについては考慮されていない場合や、どのような精度で光学的整合が実現されれば、ユーザに実物であるかのように知覚させることができるかについては言及されていないなど、未だ多くの問題が残されている。

また、これまでの研究では、物体全てをレンダリングする状況がほとんどである。本研究のように HMD によって隠された顔領域を仮想としてレンダリングし、それ以外の領域は現実の顔を利用するような、仮想と現実を融合させて1つの物体とする想定の研究は行われていない。仮想物体を丸ごと全てレンダリングするのであれば、反射特性や照明環境の再現が多少異なろうとも、色合いや質感が多少異なる物体が存在するように感じるだけで、物体自身に違和感を感じることは少かった。しかしながら、本研究では顔の部位によって仮想と現実が融合する問題設定のため、その境界部分を見ると色合いや陰影の多少の違いに対しても、異和感を敏感に感じ易いと考えられる。また、対象が日頃から注意して見ることの多い顔であることを考慮しても、物体とは異なり多少の不整合に対しても敏感に反応することが予想される。

8.1.3 光学的不整合の許容範囲

光学的不整合が生じる主な要因を以下にまとめる。図 8.2 に示すように、合成顔映像を生成するための入力顔画像を撮影したカメラと、複合現実を実現するための HMD に取り付けられたカメラの違いにより生じる色合いの不整合が考えられる。また、同一のカメラであっても、露出、シャッタースピードなどの設定が異なれば色合いに不整合が生じる。更に、カメラやその設定が同一であっても撮影場所の光源環境が異なれば、おのずと陰影や色合いに不整合が生じる。

このように光学的不整合が生じる要因はさまざまであるが、結果としては画像上での「色合い」や「陰影」の不整合として表れる。本研究では、この光学的不整合により生じる「色合い」と「陰影」の2つの要素をそれぞれ別々に扱い、ユーザに与える異和感の許容範囲について主観評価実験により調査する。次節では、主観評価実験のために色合いに不整合を定

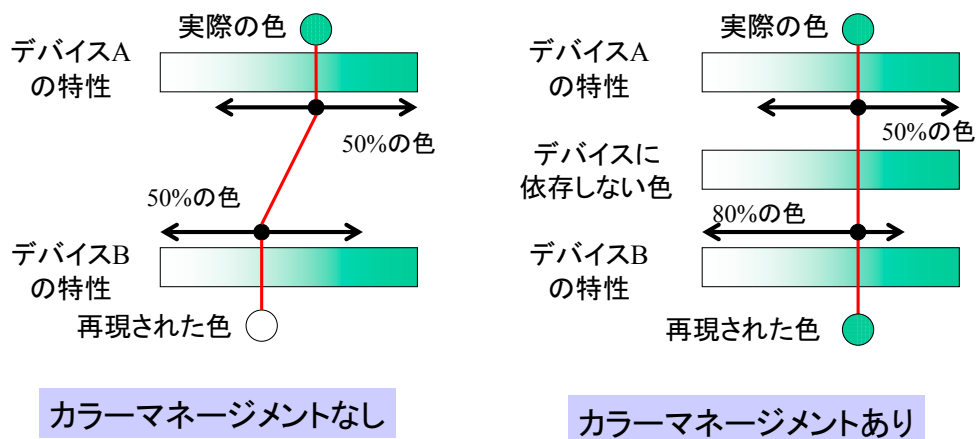


図 8.3: 色のずれ

量的に生じさせた顔画像の生成方法と、この画像を適切に被験者に提示する方法を示す。定量的に表現された色合いの不整合に対する異和感の許容範囲の主観評価実験を 8.3 節に示す。陰影の不整合に関する主観評価実験を 8.4 節に記す。

この結果を複合現実空間における光学的整合性を指す指標とし、ユーザに異和感を与えないような合成顔映像の重畳による視線情報の復元を目指す。不整合の問題が解決されれば、より現実空間に近い状況での視線情報を利用したコミュニケーションが実現可能となり、協調型複合現実空間においても現実と同様に円滑なコミュニケーションが期待される。

8.2 色合いに不整合のある顔画像の提示

8.2.1 カラーマネージメント

色合いの不整合がユーザに与える異和感を調べるためには、色合いの変化を適切に再現できるディスプレイが必要となる。また、カメラで撮影した被験者の顔色をディスプレイで、ありのままに再現できることが望ましい。しかしながら、図 8.3 左に示すように、ディスプレイやスキャナ、プリンタといった機器の間では、扱える色の範囲や偏りなどの特性によって同じ画像でもその色合いにずれが生じる。このように扱う機器の違いによって生じる色合いのずれをなくし、図 8.3 右に示すように色合いを合せて再現するカラーマネージメントを行う。

図 8.4 に示すように、各デバイスとデバイスに依存しない共通の色空間の間で、それぞれキャリブレーションを行うことで、機器の間でのカラーマネージメントを実現する。本実験ではカメラと共通色空間、共通色空間とディスプレイ間のキャリブレーションを行うことでカラーマネージメントを行った。これにより、カメラで撮影した顔の色合いをディスプレイで忠実に再現することが可能になった。

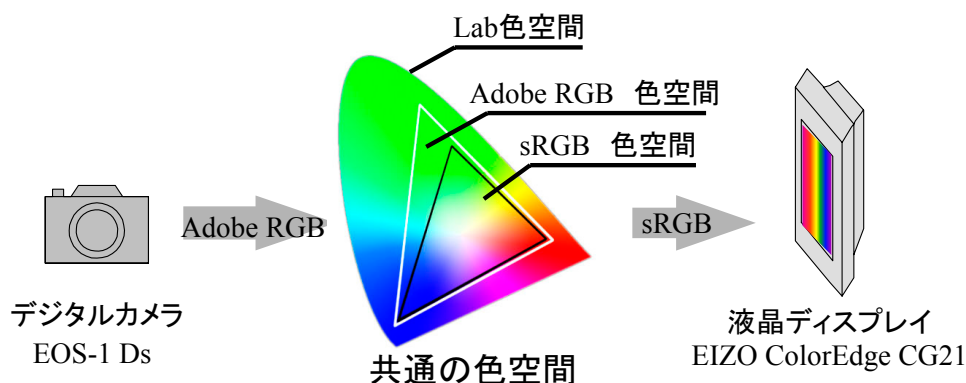


図 8.4: カラーマネージメント

カメラカラーマネージメント

色合いの異なりを表現する際の提示画像には、日本工業規格 (JIS 規格) の高精細カラーデジタル標準画像 [50] を採用した。ディスプレイの色再現に最適な sRGB 画像を利用することでカメラと共通の色空間のカラーマネージメントを実現する。

また、陰影の異なりを表現する際の提示画像には、カメラ (EOS-1 Ds) を利用し LAW モードで撮影する。sRGB に対応したカラーマトリックスを利用し、sRGB 画像への変換を行った。

ディスプレイカラーマネージメント

ディスプレイは、EIZO ColorEdge CG21 を利用し、モニターの輝度・白色点・ガンマをキャリブレーションすることでディスプレイ上での忠実な色再現を試みた。設定としては、輝度 100cd/m²、白色点：6500K、ガンマ：2.2 に設定した。このディスプレイは、ディスプレイの色再現に最適な sRGB 色空間の色合いを適切に表現することが可能である。sRGB 色空間は Adobe RGB 色空間などと比較すると色再現可能な領域が小さい。しかしながら、Adobe RGB と sRGB を比較した場合、緑色の再現性には差はあるものの、他の色領域、例えば肌色の再現性には大きな差はない。このため今回の実験では利用したディスプレイの色再現性に問題はないと考える。ディスプレイのカラーマネージメントにより、肌色の色合いを変化させた画像の色差を忠実に再現することが可能となった。

8.2.2 均等色空間の利用

均等色空間とは人間の視覚特性を考慮して、等しい大きさに知覚される色差が空間内の等しい距離に対応するように意図した色空間をいう。均等色空間の色差を利用することで、人間が知覚する色合いの違いを定量的に示すことができると考える。そこで国際照明委員会 (Commission Internationale de l'Eclairage:CIE) が 1976 年に定めた均等色空間のひとつである、

3次元直交座標を用いる Lab 表色系を利用する。Lab 色空間における色差とは、以下の式で定義される。

$$\Delta E_{ab} = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2}$$

Lab 表色系における L とは、明度を示す。a は赤から緑を、b は黄から青を示す。均等色空間の L, a, b のいずれかを変化させた顔画像を利用して主観評価実験を行うことも可能である。しかし、肌色を a 軸上で +10, b 軸上で -10 といった色の変化の指定では色彩的イメージがつかみづらく、評価尺度としては不適切であることが予想される。

このため均等色空間 Lab に、色相、彩度、明度の考え方を当てはめて表記する LCh 表色系（明度・彩度・色相角、以降 LCh）を利用する。この手法は、Lab 色空間における a, b の直交座標系を、極座標系で表現したもので、色空間は Lab と同一であり、明度も共通である。図 8.5 に、Lab 色空間を示す。図 8.5 の上下方向が L の正負を、左右方向が a 軸の正負を、奥から手前の方向が b 軸上の正負を示す。図 8.6 に、明度 L=75.4 の平面で、図 8.5 の Lab 色空間を切断した場合の断面図を示す。図中に白い円で示す座標が、撮影対象者の肌色の平均値を示している。LCh 表色系は、Lab 表色系をベースに考えだされており、L はどちらも共通尺度で明度を示す。C は彩度を表わし C の値が大きいと円の外側に位置し、あざやかさが増す。反対に、C の値が小さいと円の中心に近づくため、くすんだ色合いになる。h は色相角度を表わし、赤方向の a 軸正を 0° とし、ここから反時計方向の角度で、色の位置がわかるようになっている。例えば、90° であれば黄方向、180° であれば、緑方向を示す。

LCh で定義された、彩度 (Metric Chroma)、色相 (Metric Hue-Angle) を以下に示す。明度指数 L は、Lab 表色系の L と全く同じである。

$$\text{Metric Chroma (彩度), } C = a^2 + b^2$$

$$\text{Metric Hue-Angle (色相角), } H = \tan^{-1}(b/a), [\text{deg}]$$

Lab 表色系における色差基準色のデータを (Lt, at, bt)、試料の測定値を (L, a, b) とし、2つのデータ間の色差を ΔE_{ab} とすると、次の計算式で LCh の色差を表現することができる。また、同一の色空間を表現するための異なる表記手法といえるため、Lab と LCh どちらの表色系で色差を表現しても色空間における距離は等しい。Lab と LCh における色差は共通の尺度として利用可能である。

$$\begin{aligned} \Delta H &= \sqrt{(\Delta E_{ab})^2 - (\Delta L)^2 - (\Delta C)^2} \\ &= \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 - (\Delta C)^2} \\ \Delta L &= L - Lt \\ \Delta C &= \sqrt{a^2 + b^2} - \sqrt{at^2 + bt^2} = C - Ct \end{aligned}$$

光学的不整合により生じる色合いの変化をこの LCh 表色系で表現し、評価実験で利用する提示画像を生成する。彩度 C と色相 h の色合いの変化については、図 8.6 に示すような方向への色合いの変化となる。

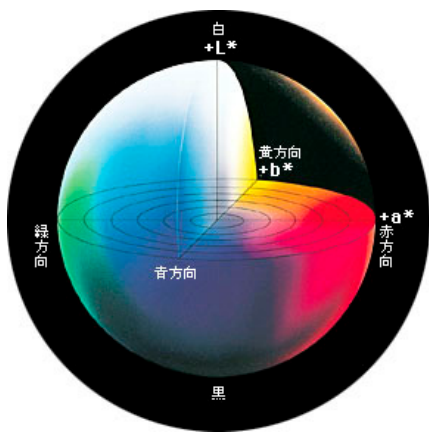


図 8.5: Lab 色空間

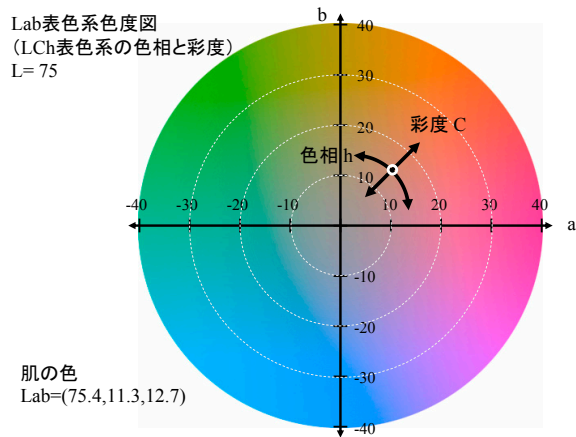


図 8.6: Lab 表色系と LCh 表色系における肌の色



図 8.7: JIS 規格の高精細カラーデジタル標準画像

8.2.3 顔の色合いを変化させた提示画像の生成

均等色空間である LCh 表色系を利用して、明度、彩度、色相のいずれかを変化させた顔画像を生成し、光学的不整合によって生じる色合いの不整合を表現する。図 8.7 に示す原画像の肌色平均値を Lab 表色系で測定すると、 $Lab=(75.4,11.3,12.7)$ となり、これを LCh 表色系に換算すると $LCh=(75.4,17.0,48.3)$ である。これを明度 $L=75.4$ の平面で均等色空間を切断した場合の断面図を図 8.6 に示す。明度 L を変化させる場合は、図 8.5 の色空間において上下の方向に動かすことに相当する。円の中心方向へ変化させる彩度の変化は、顔色をくすんだ色合いにし、円の外側方向へ変化させる変化は、顔色を彩やかな顔色へ変化させる。反時計周りに変化させる色相の変化は顔の緑色成分を強くし、時計周りに変化させる色相の変化は顔の赤色成分を強くする。

8.3 光学的不整合の色合いに対する許容範囲

本研究では，合成顔映像を HMD 領域に重畳した場合に生じる光学的不整合の色合いに対する異和感は，以下に示す 2 つの要素が主な原因であると考えられる．

- 顔色としての適切さ
- 顔上下部における色差

そこで，本研究ではまず，図 8.9 に示すような画像を提示し，顔色として適切だと許容できる範囲を調査する．次に，図 8.17 に示すような画像を提示し，顔の上部の色合いを変化させた場合に許容できる範囲について調査する．

また，図 8.22 に示すように，顔上下部における色差は同一で，顔色の異なる提示画像を複数用意し，この提示画像の異和感の大きさについて調査する．同一の色差であるにも関わらず，異和感の感じ方が異なるとすれば，異和感の要因として顔色としての適切さが判断基準の 1 つであることが明らかになると考えられる．更に，図 8.25 に示すように，顔色として適切な範囲内において異なる色差の顔画像を提示し，この異和感の大きさについて調査する．顔色として適切な範囲内であるにも関わらず，色差の大小によって異和感の強弱が変化すれば，光学的不整合により生じる異和感の要因に，顔上下部における色差が判断基準の 1 つであることが明らかになると考えられる．最後に，これまでの評価実験では，基本的に顔上部の色合いを変化させた評価実験であった．そこで，図 8.28 に示すように顔の上下部の色合いを反転させた場合に感じる異和感に違いがあるか調査する．

8.3.1 自然な顔色

図 8.7 に示すように，JIS の標準画像の中の 1 枚 [50] を基準画像として利用した．この基準画像を中心に，LCh 表色系の明度 L，彩度 C，色相 h のいずれかを変化させた画像を提示する．被験者に顔色として許容範囲にある画像を指定してもらうことで，顔色として異和感を許容できる範囲を調査する．LCh 表色系における提示画像の顔色の变化を図 8.8 に示す．提示画像例を図 8.9 に示す．

また，背景の色合いがこの許容範囲に影響を及ぼすのではないかと考える．このため，まず顔色の平均輝度と等しい灰色の背景で評価実験を行い，次に原画像である緑色の背景を利用することで，背景による顔色の許容範囲への影響があるかどうか調査を行った．

評価実験手法

図 8.10 に示すように，被験者から 90 [cm] の距離にディスプレイを設置し，現実と同じ大きさとなるように合成顔画像を提示した．提示する合成顔画像の顔色を均等色空間 $\Delta LCh(=\Delta Lab)$ における明度 L，彩度 C，色相 h の正負について，計 6 種の色合いのいずれかを色差 1 ずつ変化させる．

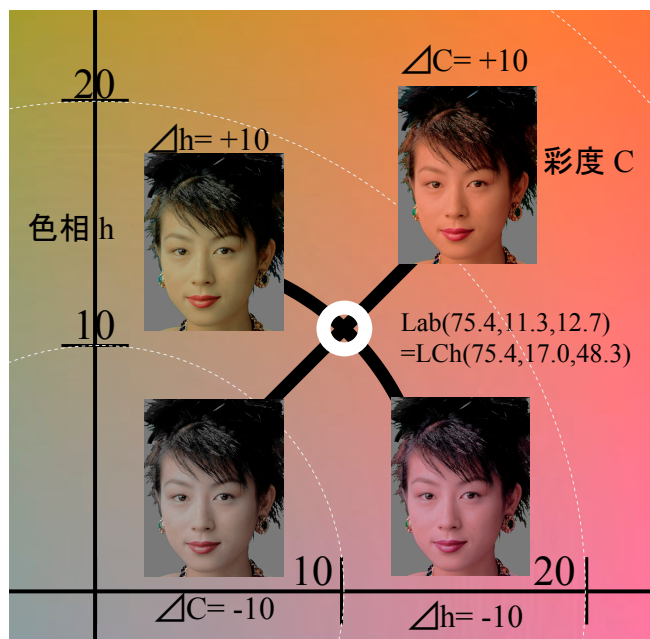


図 8.8: LCh 表色系における顔色の許容範囲を調査するための提示画像例

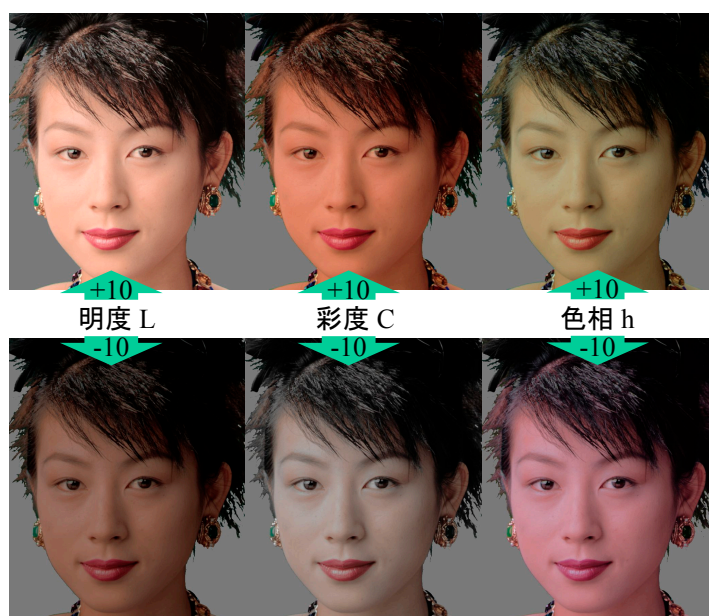


図 8.9: 顔色の許容範囲を調査するための提示画像例

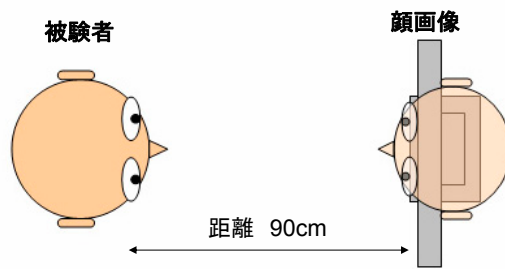


図 8.10: 主観評価実験の環境

図 8.9 に 顔 色 変 化 の グ ラ フ と 提 示 画 像 例 を 示 す . 予 備 実 験 の 段 階 で , 被 験 者 に 原 画 像 を 最 初 に 提 示 し た 場 合 , 原 画 像 か ら の 変 化 量 が 一 定 に な る よ う に 操 作 す る 傾 向 が 見 ら れ た . こ の た め 被 験 者 に は , ま ず 明 ら か に 異 和 感 が あ る 顔 画 像 を 提 示 す る . ま た , そ の 開 始 位 置 を , ラ ン ダ ム と す る こ と で 原 画 像 か ら の 変 化 量 と い う 概 念 を 気 に せ ず に , 自 然 だ と 感 じ ら れ る 顔 色 を 適 切 に 判 断 す る こ と が で き る と 考 え る .

実験タスク

明度の場合における実験方法を示す . 明らかに異和感があると考えられる提示画像を最初に被験者へ提示する . 実験タスク説明のために , 色差と提示画像の関係を図 8.11 に示す . 被験者にこのようなグラフや情報は一切提示せず , 顔画像のみを提示する . 例えば , 図 8.11 に示すように , 明度の正方向を例にまず説明する . S1 を最初の提示画像の明度変化量とする . ただし , この S1 は 色 差 の 絶 対 値 15 ~ 20 の 間 で ラ ン ダ ム に 選 択 さ れ た も の と す る . ラ ン ダ ム に 選 択 さ れ て い る こ と は , 被 験 者 に も あ ら か じ め 伝 え る . キ ー ボ ー ド の 矢 印 キ ー の 左 方 向 を 押 す こ と に よ っ て 提 示 さ れ た 顔 画 像 の 明 度 の 変 化 量 を 小 さ く す る . 被 験 者 は 色 差 1 づ つ 変 化 す る 提 示 画 像 の 顔 色 を 見 て , 異 和 感 を 許 容 で き る と 感 じ ら れ た と こ ろ で 操 作 を 止 め る こ と と す る . 例 え ば , 明 度 の 正 に 対 し て は , S1 か ら 始 め , E1 で 操 作 が 終 了 し た と す る . 反 対 に , 明 度 の 負 で は , S2 か ら 開 始 し , E2 で 操 作 が 終 了 し た と す る . こ の , 操 作 終 了 位 置 , E1 か ら E2 の 範 囲 を 異 和 感 が 許 容 で き る 顔 色 の 範 囲 と す る . 彩 度 , 色 相 に つ い て も 同 様 な 手 法 で 評 価 実 験 を 行 っ た .

実験結果

実験結果を図 8.12 に示す . ボンフェローニの多重比較法により , 明度 , 彩度 , 色相の正負 , 6 項目について絶対値を取り , 有意差があるか検定を行った ! 「明度正」と「明度負」が , 他 4 項目に対して有意水準 5 % で有意差が認められた . 日常生活における照明環境の変化により , 顔の明度は色相や彩度と比較して大きく変化することがありうる . このため , 明度方向への顔色の変化に対しては , 許容できる顔色の範囲が比較的広いと考えられる .

ハードコピーにおける好ましい肌色について羽石ら [51] や浅田ら [52] も調査しており , そ

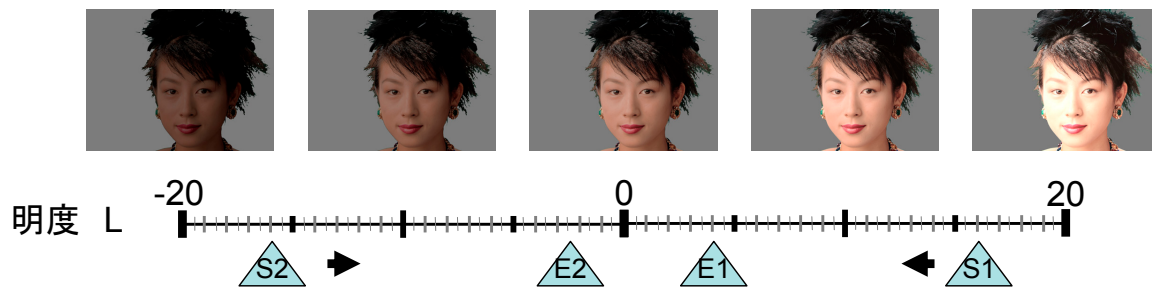


図 8.11: 顔色変化グラフと提示画像例

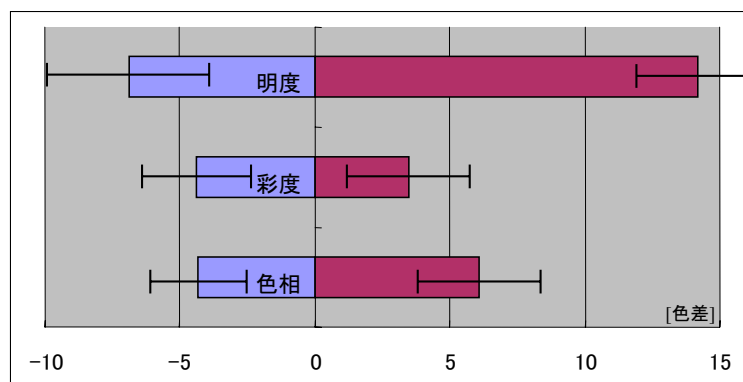


図 8.12: 自然だと許容できる顔色の範囲 (背景 : 灰色)



図 8.13: 顔色の許容範囲を調査するための提示画像例 (背景：緑)

の結果と比較しても本実験結果の妥当性が伺える。ただし，本研究での調査は，好ましい顔色の範囲を調査したのではなく，顔色として許容できる範囲を調査している。このため実験結果の顔色の範囲は当然広がっている。また，基準画像の肌色が，先行研究における好ましい肌色領域のほぼ中心に位置していることを考慮すると，基準画像として選択したことの妥当性も伺える。

背景色による自然な顔色への影響

次に，背景色が異和感を許容できる顔色の範囲に影響するかどうかを調査する。原画像である緑色の背景を利用して，同様に実験を行った。ただし，提示画像の顔色のみを変化させ，背景部分については常に一定とする。提示画像例を図 8.13 に，その色差と提示画像の関係を図 8.14 に示す。実験結果を図 8.15 に示す。背景が灰色である場合と緑色である場合の同項目の結果の平均に差があるかどうか，t 検定により，明度，彩度，色相の正負 6 項目についてそれぞれ検定を行った。「色相 正」の項目についてのみ有意水準 5 % で有意差が認められた。許容できる顔色が，背景色によって影響を受けると考えられる。

また，好ましい肌色について調査した研究 [51][52] でも報告されているように，背景色による影響だけでなく，背景パターンや記憶，顔というパターンとしての提示などさまざまな要因と密接に関係するきわめて複雑な問題であると考えられる。

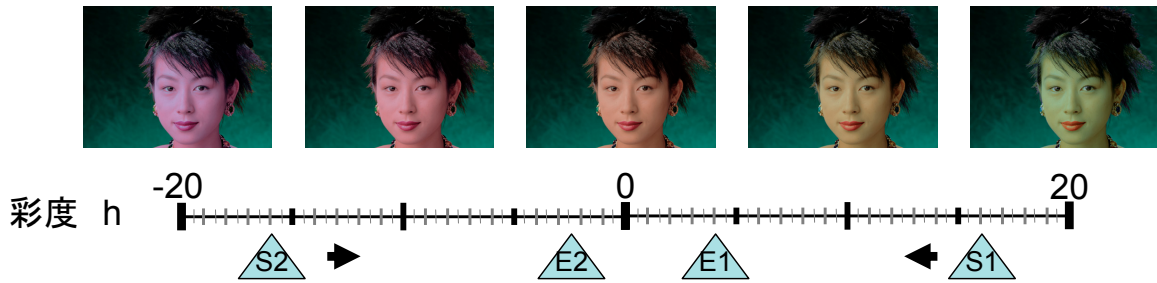


図 8.14: 顔色変化グラフと提示画像例 (背景 : 緑)

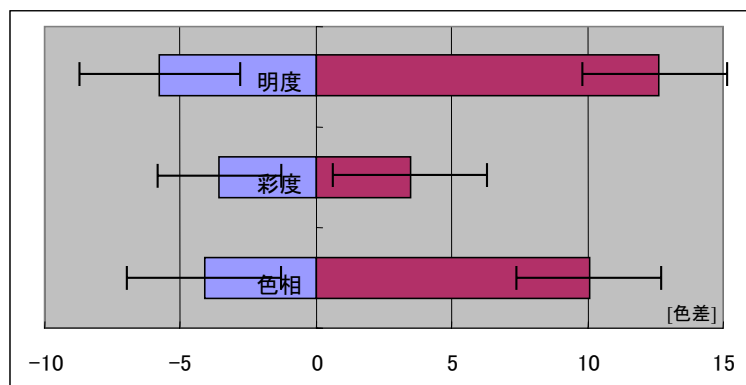


図 8.15: 自然だと許容できる顔色の範囲 (背景 : 緑)

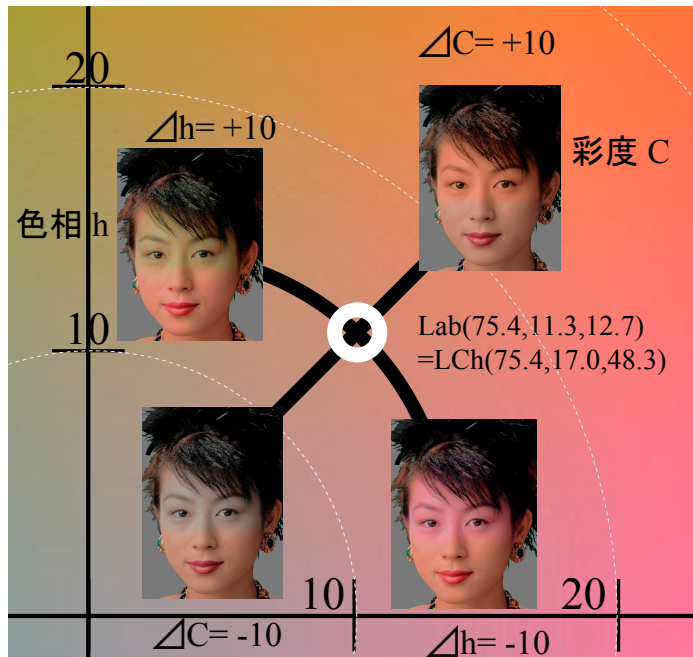


図 8.16: 顔の上下の色合いの異なり

8.3.2 顔上下部における色差の許容範囲

提示画像の生成

光学的不整合により生じる合成顔映像と現実の顔領域の色合いの違いを，LCh 表色系における明度，彩度，色相の違いとして定量的に表現する．彩度もしくは色相を調節した提示画像の例を図 8.16 に示す．生成した提示画像例を図 8.17 に示す．顔の色合いを変化させる領域には，図 8.18 に示すような透過度が輝度を示すようなマスク画像を利用した．HMD 領域に合成顔映像を重畳するような場合に，図 8.18 上に示すような境界のはっきりとしたマスクを利用すると，色合いの変化の境界，エッジ部分に強く違和感を感じる事が予想される．このため異和感の強いこのようなマスク画像は利用せずに，図 8.18 下に示すように境界をぼかしたマスク画像を利用して提示画像を生成した．複合現実感システムへの構築でも，境界をぼかさずに提示することへの利点がないと考え，主観評価実験においても境界をぼかした提示画像を利用するものとする．

評価実験手法

前小節での実験と同じように，図 8.10 に示すような実験環境とする．提示する合成顔画像の顔色を均等色空間 $\Delta LCh (= \Delta Lab)$ における明度 L ，彩度 C ，色相 h の正負それぞれについて，計 6 種の色合いを色差 1 ずつ変化させる．被験者には，明らかに異和感がある顔画像を

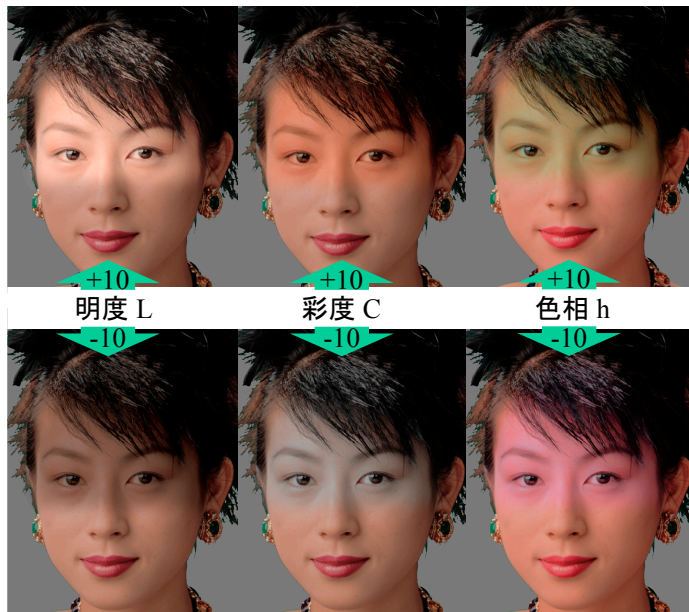


図 8.17: 提示顔画像例

提示し，異和感が許容できるまで色合いの変化量を操作してもらい，色差に対する許容範囲を調査した．これにより顔上下部における色差の許容範囲を調べることができると考える．

実験結果

実験結果を図 8.19 に示す．ボンフェローニの多重比較法により，明度，彩度，色相の正負，6 項目について，有意な差があるか検定を行った。「明度 正」と「明度 負」が，他 4 項目と，有意水準 5 % で有意差が認められた．照明の辺り具合いや顔の部位によって明度が変化することは日常生活において比較的頻繁に起りうる．このため，明度方向への顔色の変化に対しては，許容できる顔色の範囲が比較的広いと考えられる．彩度，色相を変化させた場合に，異和感を感じた要因としては，顔の上部が顔色として不適切な色合いに達したことが要因ではないかと考えられる．反対に，明度の場合には，顔色としては適切であると感じる範囲が広いいため，考えられる要因としては，顔の上下における色差が大きくなりすぎたことではないかと考える．

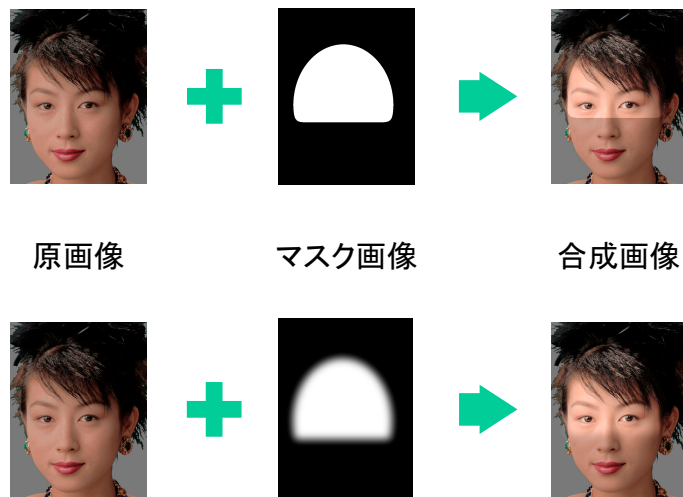


図 8.18: マスクを利用した色合いの異なる顔画像例

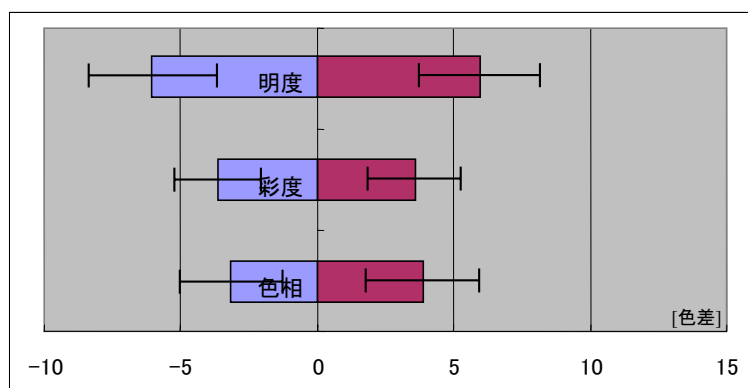


図 8.19: 色合いの変化に対する主観評価

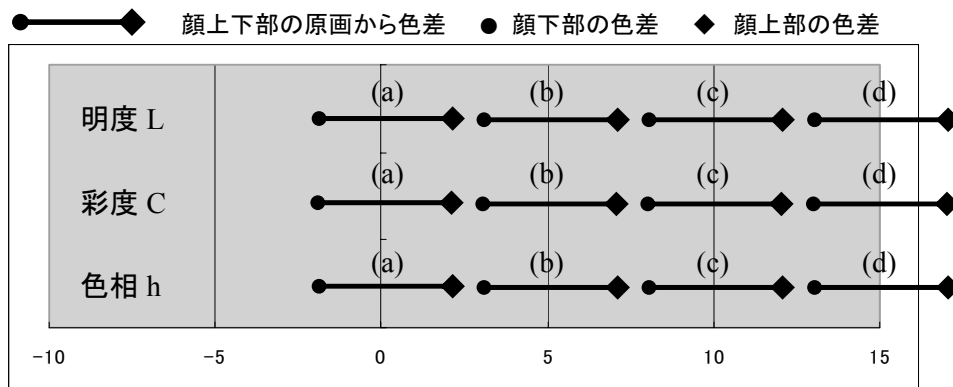


図 8.20: 提示画像の色合い

8.3.3 同一色差における異和感の比較

本小節では，図 8.22 に示すように，顔上下部の色差は同一であるが，顔色が異なる顔画像を複数提示し，この異和感の大きさについて調査する．この実験により，顔上下部の色差のみでなく，顔色としての適切さという要因が異和感の強弱に影響するかどうか明かになると考えられる．

評価実験手法

これまでの実験同様に，LCh 表色系による顔色の操作を行った．顔上下部における色合いの操作については，前述の実験と同様のマスク画像を利用する．提示画像の色差は全て 4 とし，顔色の操作は図 8.20 に示す通りとする．これまでの実験結果から色差 4 程度であれば，異和感を許容できるかどうかの境界あたりであるとためである．これに顔色という指標が加わった際の，異和感の強弱について本実験により調査する．図 8.20 において，線で結ばれた \blacklozenge が，提示画像の顔上下部の色合いを示す． \bullet が顔下部の色合いの操作量を示し， \blacklozenge が顔上部の色合いの操作量を示す．

評価実験の方法としては，図 8.21 に示すような，異和感の強さを示す 7 段階の評価尺度として実験を行った．異和感の強弱を示す評価尺度として，自然，不自然を対象の評価尺度として選択した．提示画像を図 8.22 に示す．被験者には提示画像をランダムに提示し，またその色合いについては知らせないで実験する．

実験結果

実験結果を図 8.23 に示す．ボンフェローニの多重比較法により，明度，彩度，色相の種類別に検定を行った．明度については，有意差が認められなかった．次に彩度の場合であるが，有意差が認められた．顔色が変化するにつれて，不自然さが増していると考えられる．色相の

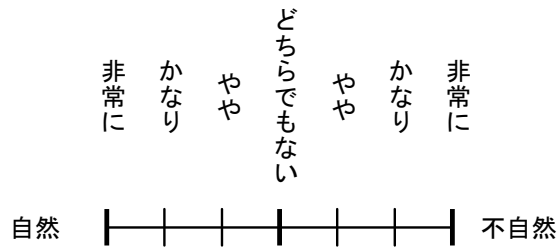


図 8.21: 異和感の強さを示す 7 段階の評価尺度

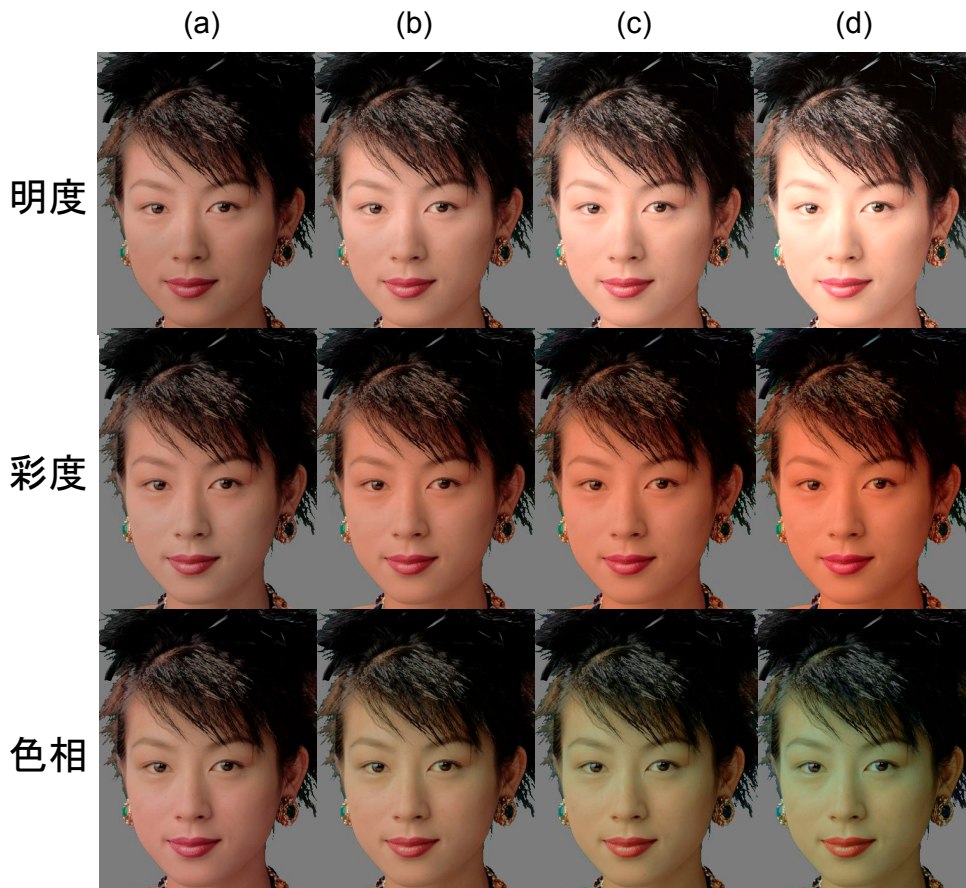


図 8.22: 同一色差における異和感を比較するための提示画像

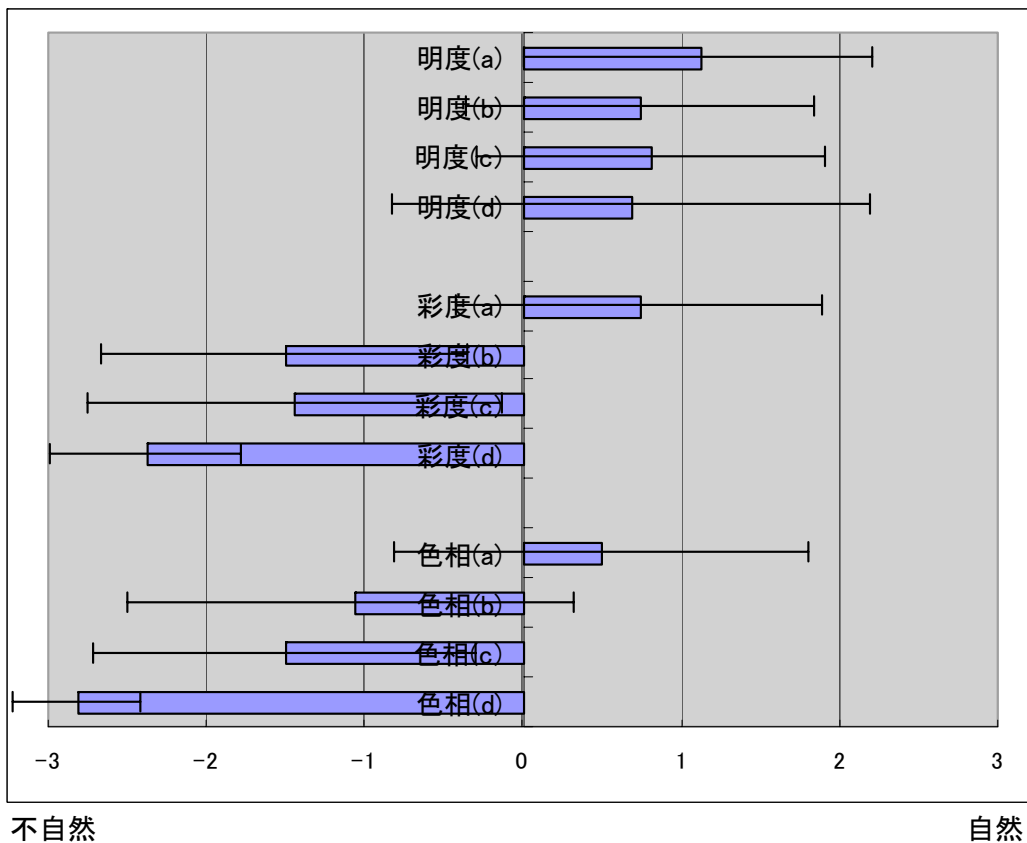


図 8.23: 同一色差における異和感の比較

場合にも、有意差が認められた。こちらも顔色が変化するにつれて、不自然さが増している。

顔の上下の色差はすべて同じであるにも関わらず、このように顔から受ける違和感の印象は大きく異なる。このような実験結果から考えて、8.3.1 節に示す顔色としての許容範囲を超えた色合いでの合成顔画像を提示した場合には、明らかに強い異和感を感じ、不自然さが増していると考えられる。明度の場合には、違和感に有意差が認められなかったが、これは、8.3.1 小節の実験結果を見てもわかるように、違和感を許容できる顔色の範囲が正方向では約 14 となっている。このため、適切な顔色としての許容範囲が広い明度の場合、今回の実験で提示した顔画像の明度変化は、違和感に有意差がでるほど不適切な顔色だったのではないかと考えられる。この実験によって顔に対する異和感の強弱には、顔色として適切かどうかという要因が含まれることが明らかになったと考える。

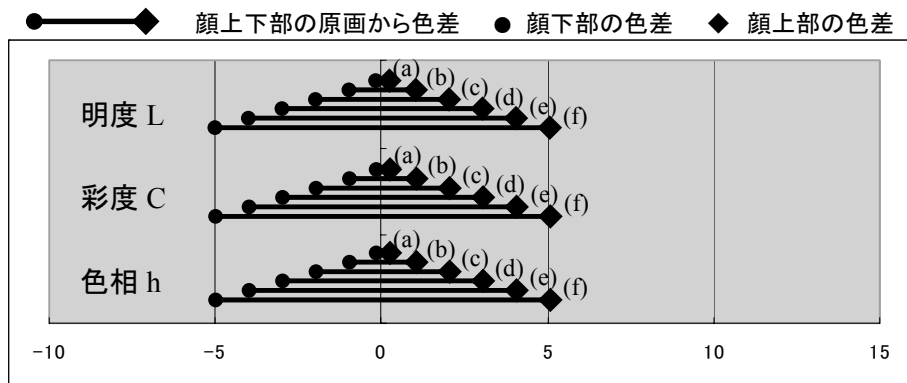


図 8.24: 提示画像の色合い

8.3.4 色差の大きさと異和感の強さ

顔の上下部において光学的不整合が生じた顔画像の異和感の要因として、「色差の大きさ」という要因があるかどうかを調査する．顔上下部における色差の大小によって異和感の強弱が変化するか調査する．顔色として適切であるにもかかわらず，色差の大小によって異和感の強弱が変化する場合「色差の大きさ」という要因が異和感の強弱に影響することが明らかになると考える．

評価実験手法

これまでの実験同様に，LCh 表色系による顔色の操作を行った．顔上下部における色合いの操作については，これまでの実験と同様のマスク画像を利用する．顔上下部における色合いの操作については，明度，彩度，色相いずれかにおける色差を操作する．図 8.24 に示すように，色差 0 から 10 の間で 2 ずつ色差を変化させた提示画像を用意する．

図 8.21 に示すような，異和感の強さを示す 7 段階の評価尺度を利用して評価実験を行った．異和感の強弱を示す評価尺度として，自然，不自然を対象の評価尺度として選択した．提示画像を図 8.25 に示す．被験者には提示画像をランダムに提示し，またその色合いについては知らせないで実験する．

実験結果

実験結果を，図 8.26 に示す．顔上下部における色差がない原画像の場合に，もっとも提示画像の自然さが高かった．例外もあるが，明度，彩度，色相の項目において色差 0 の場合に最も自然さが高く，色差が大きくなつにつれて不自然さが増す傾向にある．光学的不整合により顔の上下において色合いの異った顔に対し，色差が大きくなるほど違和感が強くなると考えられる．

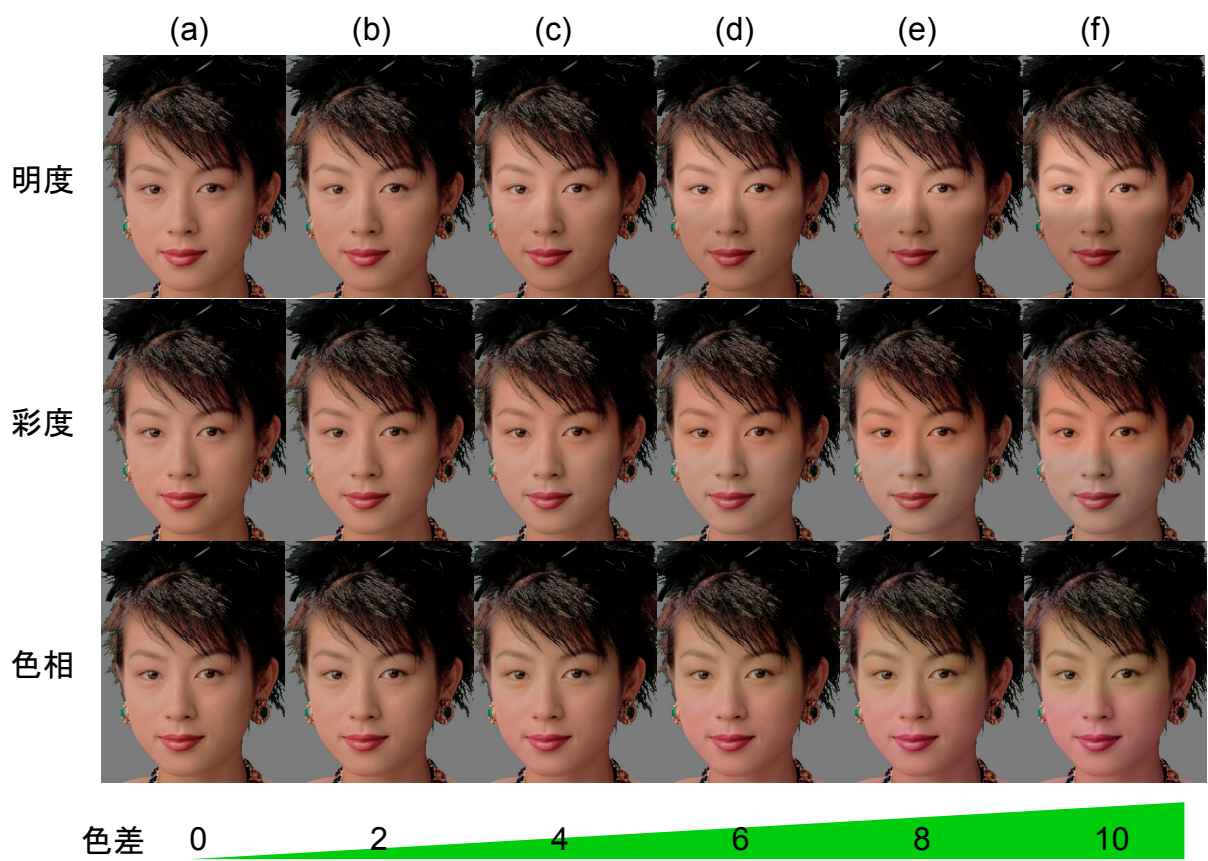


図 8.25: 色差の変化に対する異和感の強さを調査するための提示画像

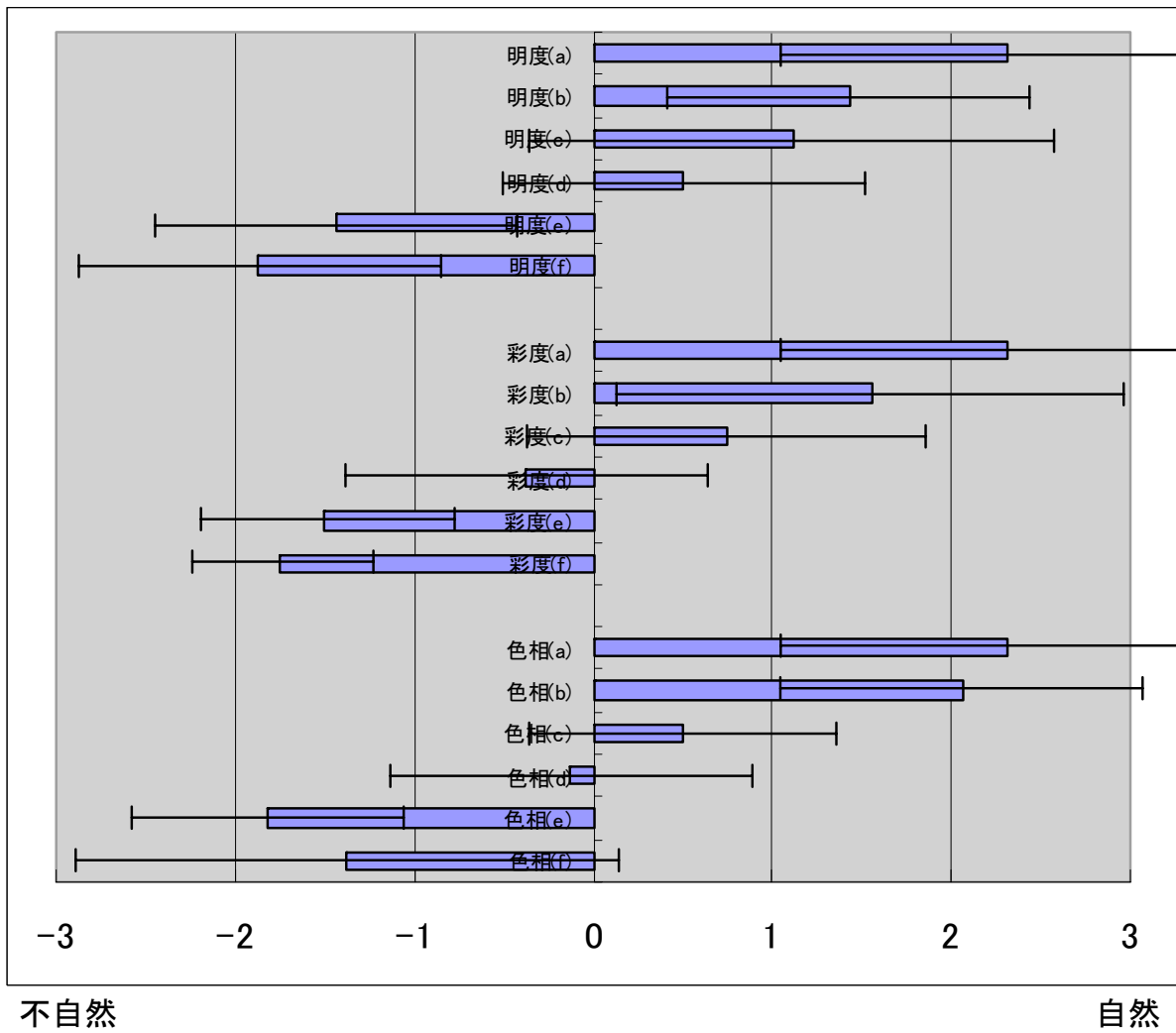


図 8.26: 色差の大きさと異和感の強さ

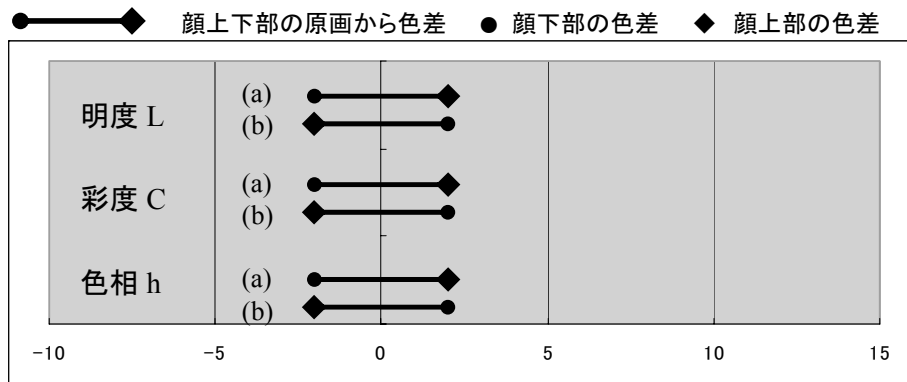


図 8.27: 提示画像の色合い

8.3.5 顔の色合いの上下反転による影響

これまでの評価実験では，基本的に顔上部の色合いを操作した提示画像を利用する評価実験であった．そこで図 8.28 に示すように，顔上下部の色合いの操作を反転させた場合に感じる異和感の強弱に違いが生じるのか調査する．

評価実験手法

これまでの実験同様に，LCh 表色系による顔色の操作を行った．顔上下部における色合いの操作については，これまでの実験と同様のマスク画像を利用する．提示画像の色差は全て 4 とし，顔色の操作は図 8.20 に示す通りとする．前節までの実験結果から色差 4 程度であれば，異和感を許容できるかどうかの境界あたりであると予想されるためである．これに顔の色合いの操作を上下で反転した場合に，異和感の強弱の評価に違いが生じるかを調査する．

図 8.21 に示すような，異和感の強さを示す 7 段階の評価尺度を利用して評価実験を行った．異和感の強弱を示す評価尺度として，自然，不自然を対象の評価尺度として選択した．提示画像を図 8.28 に示す．被験者は提示画像をランダムに提示し，またその色合いについては知らせないで実験する．

実験結果

実験結果を，図 8.29 に示す．ボンフェローニの多重比較法により，6 項目の平均に有意な差があるか検定を行った．検定の結果，有意水準 5 % で有意差は認められなかった．顔の上下で生じる色合いの不整合が，上下で反転しても顔の印象から受ける異和感の強弱にはあまり影響しないと考えることができる．

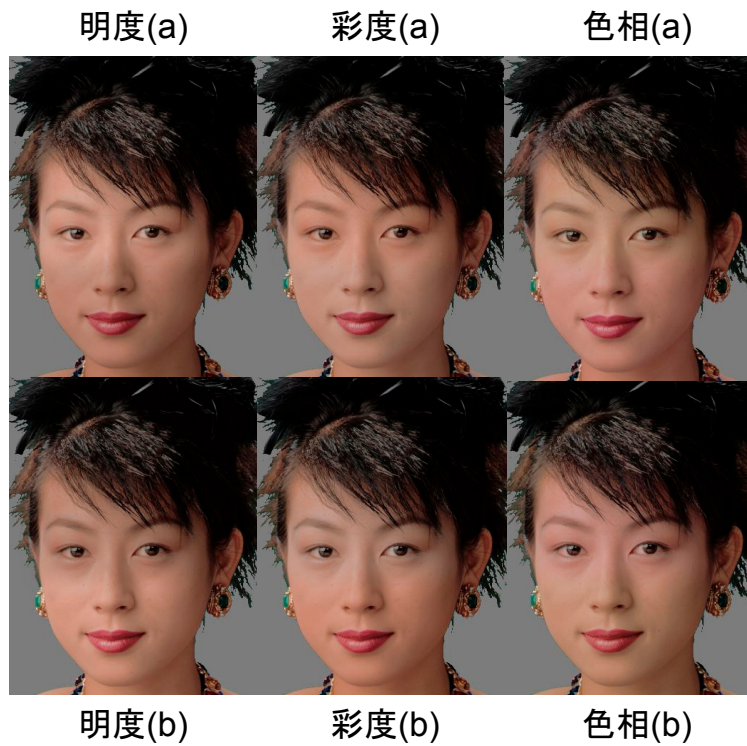


図 8.28: 顔の色合いの上下反転の影響を調査するための提示画像

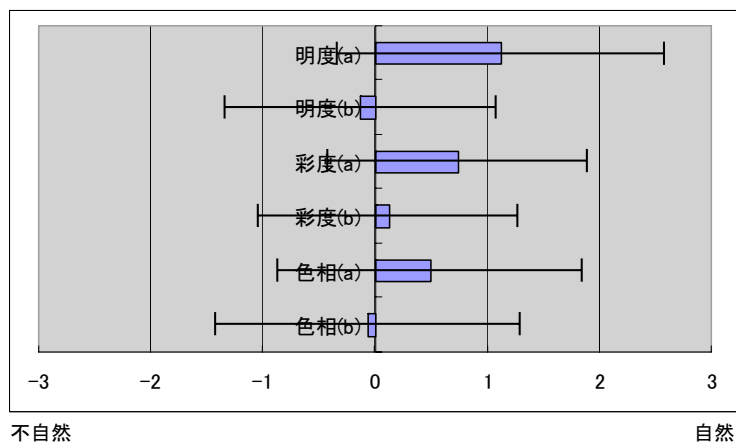


図 8.29: 顔の色合いの上下反転による異和感への影響

8.3.6 まとめ

8.3.1 小節における主観評価実験で，顔色として許容できる範囲を明らかにした．明度の正負方向への顔色の変化は，彩度，色相と比べて顔色として許容できる範囲が広いことが明らかになった．また，この顔色の許容範囲が提示画像の背景によって影響を受けることを明らかにした．8.3.2 小節における主観評価実験で，顔の上下部において色合いに不整合を持たせた顔画像を提示することで，色合いの不整合に対する許容範囲を明らかにした．ここにおいても明度の正負方向への顔色の変化は，彩度，色相と比較し許容範囲が広いことが明らかになった．8.3.3 小節における主観評価実験で，色合いの不整合に対し違和感を感じる要因として，顔色としての適切さという要因が含まれることを明らかにした．8.3.4 小節における主観評価実験で，色合いの不整合に対し違和感を感じる要因として，色差という要因が含まれることを明らかにした．8.3.5 小節における主観評価実験で，顔の色合いの不整合が上下反転しても，その違和感の強さに影響がないことを明らかにした．

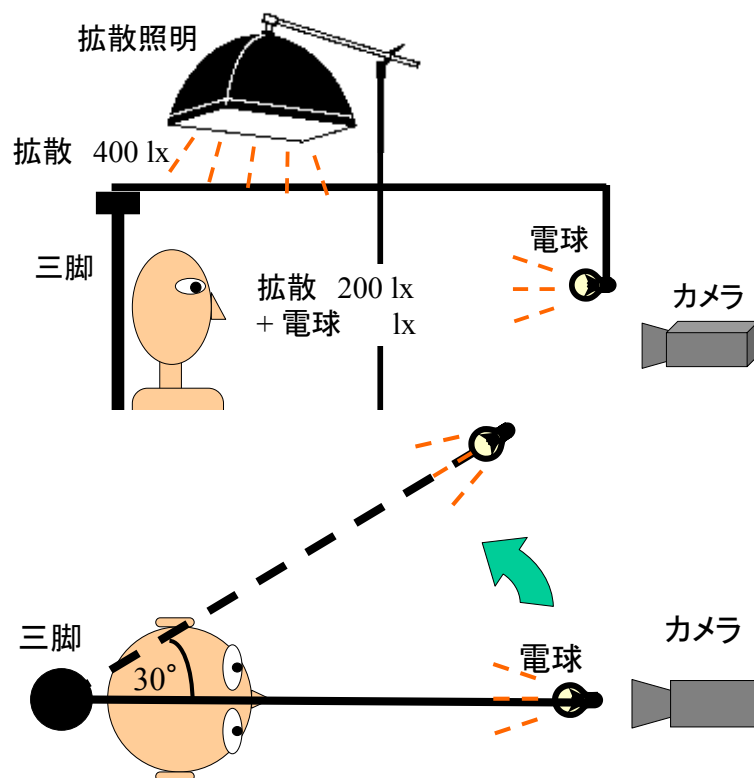


図 8.30: 陰影の異なる顔画像の撮影環境と照明環境

8.4 光学的不整合の陰影に対する許容範囲

8.4.1 顔上下部における陰影の不整合の許容範囲

本節では，合成顔映像を HMD 領域に重畳した場合に生じる光学的不整合の陰影に対する異和感の許容範囲を明らかにする．色合いの不整合に対する許容範囲の調査と同様に，陰影の不整合が生じた顔画像を提示し，陰影の不整合に対する許容範囲を調査する．

陰影の異なる顔画像の撮影環境

照明環境の異なる顔画像の上下部を組み合わせることで陰影に不整合のある顔画像を生成する．そこで，陰影に不整合のある顔画像を生成するための入力画像として，異なる照明環境の顔画像を撮影する．撮影環境と照明環境の様子を図 8.30 に示す．環境光として被写体の上部から拡散光で照す．次に，照明環境の異なる顔画像を撮影するために，電球を約 1 [m] 先のアーム先端に設置し，角度 10 度ずつ変化させながら撮影を行う．

環境光である拡散照明のみを点灯した状態で，被写体である顔の位置に照度計を置き測定する．照度計を上部に向けた場合の明るさが約 400 [lx] になるように設定し，正面を向けた



図 8.31: 陰影に不整合のある顔画像生成法

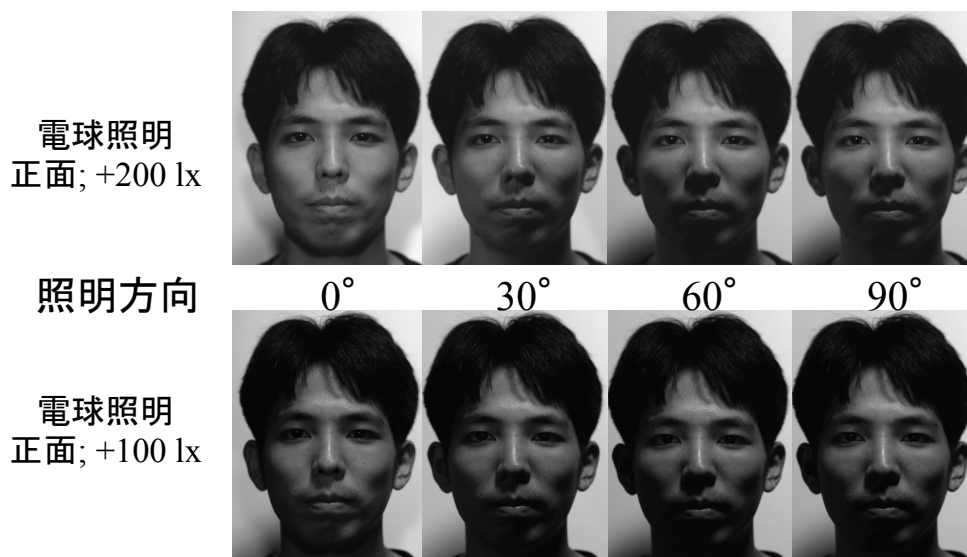


図 8.32: 提示画像例

場合に約 200 [lx] になるように設定した．この明るさは，一般的な室内の照明環境と同程度の明るさである．次に，電球が正面にある状態で点灯し，照度が+200 [lx] もしくは+100 [lx] の場合において撮影を行う．

陰影に不整合のある顔画像生成

色合いの違いによる影響を省いて，陰影のみによる異和感の調査を行うために画像はすべてグレースケールとする．上記の撮影環境で撮影した顔画像を入力画像として利用し，図 8.31 に示すように，陰影に不整合のある顔画像を生成する．顔の上部は常に正面に電球がある場合の画像を利用し，顔の下部は電球の方向が異なる画像を利用する．色合いの実験と同様に，2つの画像の境界はぼかして合成を行う．生成した提示画像例を図 8.32 に示す．上段は電球の照度が +200 [lx] の場合の合成画像を示し，下段は電球の照度が +100 [lx] の場合の合成画像を示す．

電球照明
正面; +200 lx



電球角度

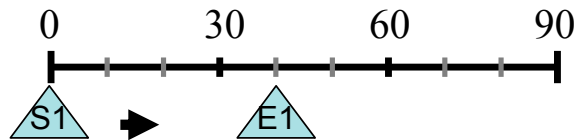


図 8.33: 評価方法

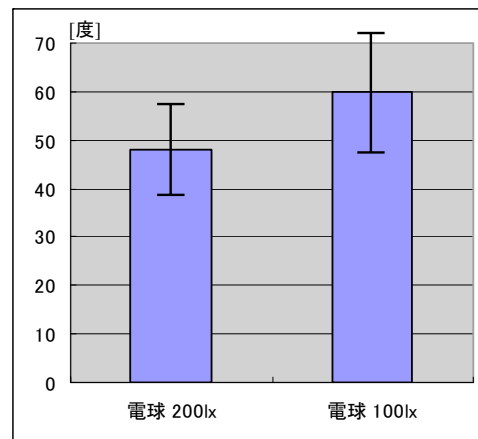


図 8.34: 陰影の異なる顔画像の撮影環境

評価実験手法

色合いの不整合に対する主観評価実験と同じように、被験者から約 90 [cm] の距離にディスプレイを設置し、実際の顔と同じ大きさで表示するように設定し、主観評価実験を行った。被験者には、開始位置 S1 からキーボードを操作して、提示画像を 1 つずつ切り替え異和感を許容できる範囲で、この操作を止めてもらうものとする。例では、操作終了位置 E1 で操作終了とし、ここを陰影の不整合許容範囲とした。

実験結果

実験結果を、図 8.34 に示す。t 検定の結果、有意水準 5 % で有意差が認められた。環境光に対する電球の照度が高いほど、小さな角度変化にも異和感を感じやすいことがわかる。また、実験の感想としては、照明の方向が 90° の画像を見た場合にも、それほど異和感を感じない

との感想もあった。環境光と電球の照度が同程度の場合にも、50°あたりまでは異和感を許容できるとしている。このような結果を踏まえると、通常の光源環境で陰影に多少の不整合が生じていても、それほど強い異和感を覚えないのではないかと考えられる。陰影による異和感は、環境光に対して不整合の原因となる電球の照度が高いほど異和感が強くなることが明らかになった。

8.5 異和感の解消

8.3節の実験結果より、顔上下部において色差4程度の色合いの不整合が許容範囲であることが明らかになった。本システムで視線情報を復元する場合に生じる色合いの不整合は、この許容範囲を明らかに越える。このため光学的不整合による異和感を解消するためには、この色合いの不整合を許容範囲内に抑える必要があると考える。

また、8.4節の実験結果より顔上下部における陰影の不整合に対してはそれほど強い異和感を与えないのではないかと考えられる。本研究では天井にのみ照明があるような、一般的な室内の光源環境に限れば、陰影の不整合は許容範囲内であると考えられる。

本研究では、光学的不整合による違和感を解消するために、色合いの不整合をカラーマッチングにより解決する。本研究の視線情報復元手法では、HMDカメラで撮影したHMDを装着した顔上部に、高解像度カメラで撮影した顔画像から生成した顔映像を重畳している。このため、顔上下部で色合いの不整合が生じ、これがコミュニケーションを阻害する異和感になるのではないかと考える。そこで図8.35に示すように、合成顔映像を生成するために撮影している高解像度カメラの画像の色合いを、複合現実世界における現実世界を撮影しているHMDカメラの色合いに合わせるカラーマッチングを行う。これにより顔映像を重畳した際に生じる色合いの不整合を大幅に軽減できると考える。

8.5.1 カラーマッチング

本研究では、マクベスのカラーチャートを同一光源環境下にて、HMDカメラと高解像度カメラ(EOS-1Ds)で撮影する。また、同一環境下において両カメラで顔を撮影する。

高解像度カメラで撮影したマクベスのカラーチャートの色合いを、カラーマッチングすることで、HMDカメラで撮影したマクベスのカラーチャートに色合いを合わせる。このカラーマッチングに利用した色の補正値を、そのまま高解像度カメラで撮影した顔画像に適用することで、HMDカメラで撮影した顔の色合いに合わせることができる。このため顔映像重畳時の色合いの不整合を大幅に軽減できると考える。小山らの、Photoshopを利用してカメラの色合いを理想値にあわせるカラーマッチング手法[53]を参考にした。

本節では、8.2節に示すカラーマネージメントのように理想的な色合いに各デバイスの色合いを合わせる手法はとらず、一方のカメラをもう一方のカメラの色合いに近付ける手法を採用した。主な理由を以下に示す。

- リアルタイムでキャプチャされているHMDカメラの画像にリアルタイムで色補正しな

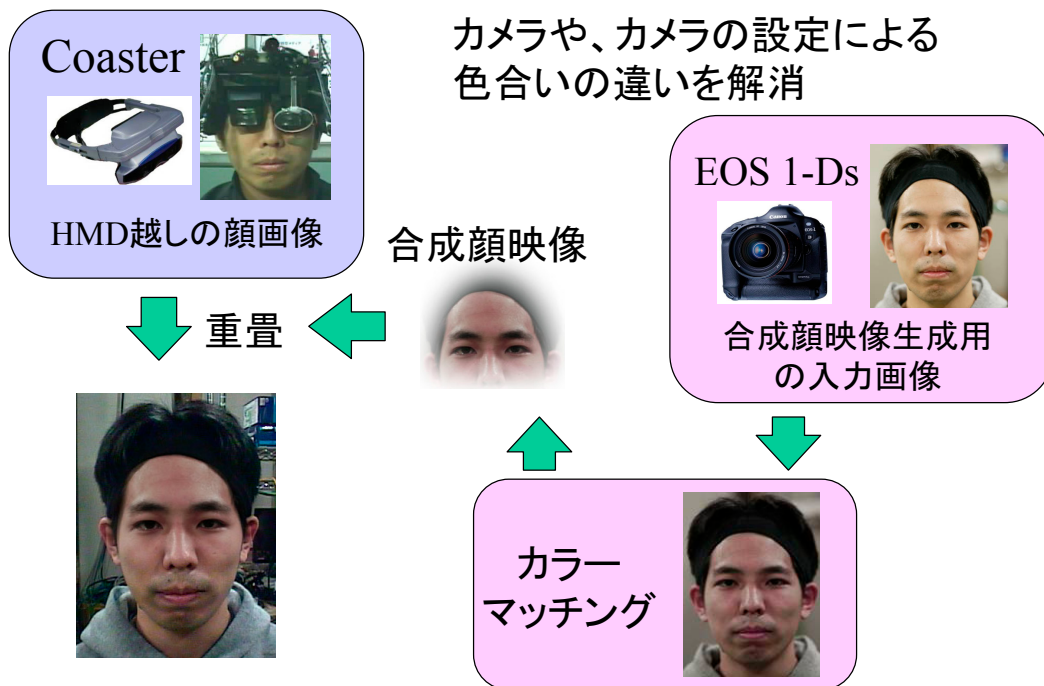


図 8.35: カラーマッチング

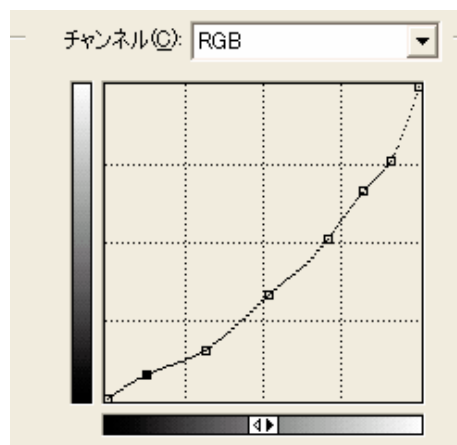


図 8.36: トーンカーブ

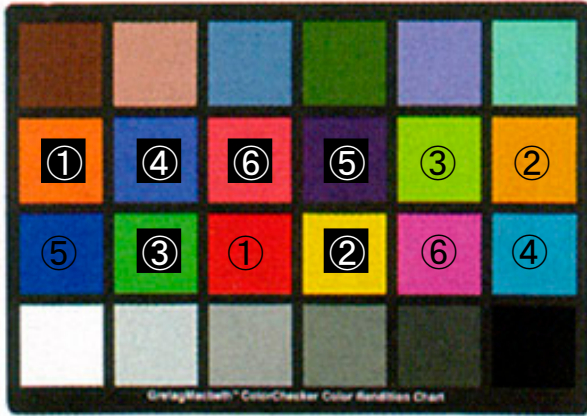


図 8.37: マクベスカラーチャート

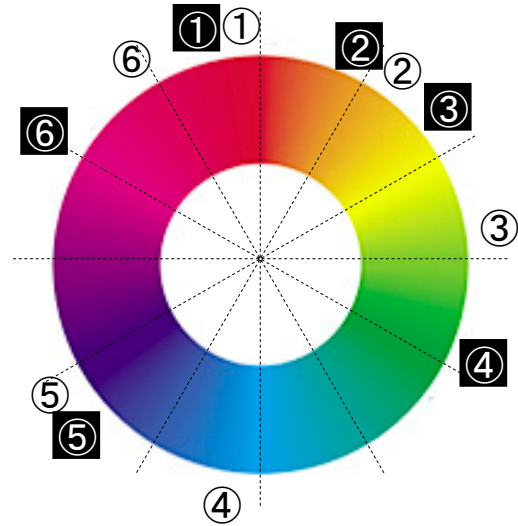


図 8.38: 色相環上での色分布

がら描画することは計算コストが高い。

- HMD カメラの画質は良好とはいえず，色補正を加えることによる画質劣化は避けるべきである。
- 顔映像生成用のカメラは，十分な解像度とダイナミックレンジをもっており，色補正による多少の画質劣化には十分耐えうる。
- 色合せするカメラが 2 台である。

本研究の目的は，複合現実感で提示される映像中での色合いの異なりによる違和感の低減である。どちらの手法でも，色合いの不整合を低減することは可能である。しかしながら，高解像度カメラの画像を HMD カメラの画像の色合いに合わせる手法の方が，計算コストも少く，画質劣化も少ないと考えられる。そこで本研究では小山らの手法 [53] を参考に，高解像度カメラの色合いを HMD カメラの色合いに直接合わせる新たなカラーマッチング手法を開発する。

ダイナミックレンジとグレーバランスの補正

まず，同一光源環境下において撮影されたマクベスのカラーチャートの下段を利用し，ダイナミックレンジとグレーバランスの補正值を決める。高解像度カメラで撮影したカラーチャート下段の各色の輝度平均値を，HMD カメラで撮影したカラーチャート下段の各色の輝度平均値と同じになるように，図 8.36 に示すようにトーンカーブを合わせる。これによりダイナミックレンジとグレーバランスの補正を行う。



図 8.39: カラーマッチング結果

色相と彩度の補正

マクベスカラーチャートの上から 1 段目を利用すると彩度の低い色合いを利用し色補正を行うこととなり補正値が不安定になり不正確になりやすい．このため色相と彩度の補正には、マクベスカラーチャートの中でも彩度の高い 2 段目と 3 段目を利用する．

まず、図 8.38 に示すように、ターゲットとなる 12 色を HSB 色相環上に並べ、この 12 色の色相値で 1 つおきに交互になるように 6 色ずつ 2 つのグループに分ける．2 つに分けたグループを図 8.37、図 8.38 に、黒字と白抜の 1～6 で示す．1 回目の色相と彩度の補正には、黒字で示された 6 色を利用する．1 回目の 1 色目として、黒字の 1 で示された色を利用して補正を行う．色相、彩度、明度に影響を与える範囲を隣の黒字の色とする．1 回目の 1 色目の黒字の 1 の補正の場合には、黒字の 6 から 2 の範囲が補正で影響を与える範囲とする．補正値には、HMD カメラで撮影したカラーチャートと高解像度カメラで撮影したカラーチャートとの差分を利用する．1 回目 2 色目として黒字の 2 を利用して補正を行う．補正範囲は黒字の 1 から 3 として、同様に補正を行う．1 回目の残り黒字の 4 色についても同様に補正を行う．

次に、図 8.37、図 8.38 に示された白抜の 1～6 の色を利用して 2 回目の補正を行う．1 回目の操作と同様に、白抜の 1 番から順に補正を行い、6 色の補正値が決定したところで補正を実行する．このようにして、彩度、色相の補正を行った．

8.5.2 カラーマッチング結果と考察

カラーマッチングした結果を、図 8.39 に示す．補正前と比較してカラーチャートの色合いの不整合が大幅に解消されていることが確認できる．同様の補正値を利用して、カラーマッチングされた顔画像を見ても不整合の解消が確認できると考える．この結果を踏まえて理想

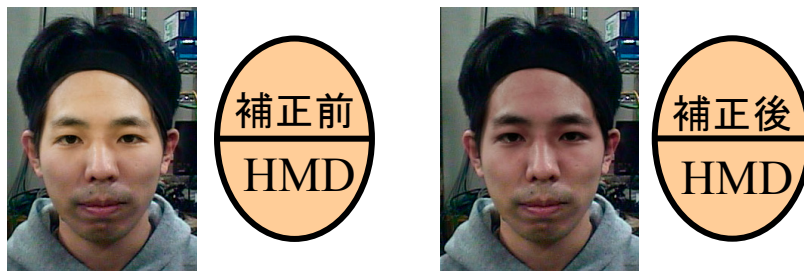


図 8.40: カラーマッチング前後における顔画像の理想的条件における重畳

的な同一光源環境下であれば複合現実空間において，合成顔映像を重畳した際にどの程度の色合いの不整合となるかを確認する．

カラーマッチング前後における不整合の程度を比較するために理想的に顔映像の重畳を行えた結果として PhotoShop を利用して顔映像を重畳した結果を図 8.40 に示す．高解像度カメラで撮影された顔画像をカラーマッチングし，この顔上部を HMD カメラで撮影した顔画像に重畳した．補正後の顔画像は，不整合の問題が大幅に解消されていることが確認できる．また，補正後における顔画像平均色の色差を調べたところ Lab 色空間において色差 2.0 未満であり，顔色として許容できる範囲内であると考えられる．

実際にシステムで顔画像を重畳した結果を図 8.41 に示す．これまでの視線情報の復元と比較し，顔の色合いが不自然なく再現されていることが確認できる．また，顔の上半分のみを重畳し視線情報を復元しているが，その境界の色合いの不整合も許容できる範囲内であると考えられる．画像では確認できないが，顔上部のみを重畳することで口の動きもありまますを提示することが可能となった．カラーマッチングにより，色合いの不整合が大幅に軽減され，光学的不整合による違和感を大幅に軽減することに成功したと考える．



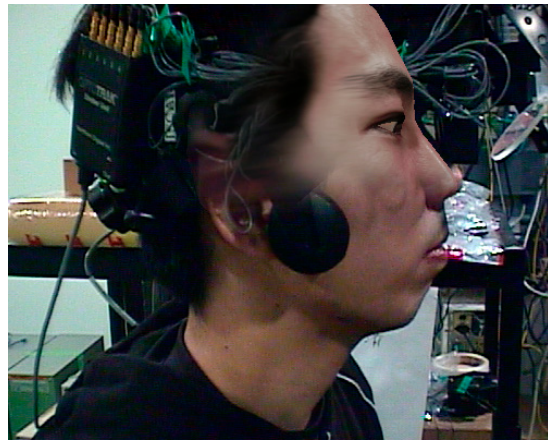
復元前 (正面)



復元後 (正面)



復元前 (横向き)



復元後 (横向き)

図 8.41: カラーマッチング後の視線情報の復元

第9章 まとめ

本研究では，協調型複合現実空間における視線情報の復元を目的として，以下の二つの手法でまぶたの動きを含む任意方向及び任意視線の顔映像を生成した．

- 3方向からの顔画像を利用した簡易な顔映像生成手法
- スキャナーを利用した高精細顔映像生成手法

3方向からの顔画像を利用した手法では，3次元顔形状を復元し，これにテクスチャをマッピングすることで顔映像をリアルタイムに生成した．眼を開いた3方向からの顔画像と眼を閉じた3方向からの顔画像を入力とし，これらをモーフィングすることでまぶたの動きを再現した．あらかじめ3次元モデルの算出とテクスチャのブレンディングを行うことで，リアルタイムレンダリング時における計算コストの大幅な削減に成功した．また，眼球テクスチャを平行移動することで任意視線の再現を行った．

スキャナを利用した手法では，スキャナで計測した高精細顔形状に，高解像度デジタルカメラで撮影した高解像度テクスチャをマッピングすることで，高精細な顔映像を生成することに成功した．更に，異なる高精細顔形状間のモーフィングを，対応関係のある特徴点を基に再分割することにより実現し，まぶたの動きの再現に成功した．あらかじめ3次元形状の再分割とテクスチャのブレンディングを行うことで，リアルタイムレンダリング時における計算コストの大幅な削減に成功した．眼球テクスチャを平行移動することで任意視線の再現を行った．

視線検出機構によりユーザの視線情報を，リアルタイムで検出することに成功した．更に赤外線3次元位置センサを利用して，ユーザ頭部の位置姿勢をリアルタイムで算出した．これらの情報を利用してHMD装着時に失われる視線や眼の表情の再現した顔映像を，リアルタイムに被重畳者のHMD領域に重畳し視線情報の復元を行った．対面での主観評価実験を行い，アイコンタクトを含む視線認知精度を調査し、本システムによる視線情報の復元の有効性を検証した．同様に，机上作業を想定し，机上にマーカーを並べる視覚的共同注意の主観評価実験を行い，本システムによる視覚的共同注意の再現の有効性を検証した．

また，複合現実空間における光学的不整合を「色合い」と「陰影」の不整合の2つに切り分けて考え，それぞれの不整合に対する異和感について主観評価実験を行った．色合いに対する異和感を調査した結果，以下に示す2つの要素が異和感の強弱を決める主な要因であることを明らかにした．

- 顔色としての適切さ

- 顔上下部における色差

陰影の不整合に対する評価実験を行い、環境光に対する電球の照度が高いほど、小さな角度変化にも異和感を感じやすいことを明らかにした。また、同時に陰影に対する違和感がそれほど強くないことも明らかになった。光学的不整合に対する異和感の調査の結果、複合現実感において起こりうる色合いの不整合に対しては、許容範囲外である。一方、陰影の不整合に対しては、天井に照明があるような一般的な光源環境に限れば、許容範囲内であると考えられる。

これら光学的不整合に対する異和感の主観評価実験の結果をふまえて、色合いの不整合を補正することで、光学的不整合に対する違和感を大幅に解消できると考えカラーマッチングを行った。合成顔映像を生成するための顔画像の顔色を、HMD カメラの色合いにカラーマッチングすることで、色合いの不整合を小さくし、違和感の軽減に成功した。

謝辞

本論文の作成にあたり，懇切丁寧な御指導を与えて下さった，本学システム情報工学研究科大田友一教授に感謝の意を表します．研究内容について多くの助言を頂きました大阪大学 産業科学研究所 向川康博助教授，及び本学システム情報工学研究科 北原格講士，に感謝の意を表します．

本論文の査読をして下さり，また貴重な御意見を頂きました，本学システム情報工学研究科 岩田洋夫教授，産業技術総合研究所 情報技術研究部門 喜多泰代様に心からお礼申し上げます．

ゼミなどを通して参考になるアドバイスを頂きました，京都大学 学術情報メディアセンター 中村裕一教授，本学システム情報工学研究科 亀田能成助教授，本学システム情報工学研究科 掛谷英紀講士に感謝いたします．

本研究中で使用した HMD はキヤノン（株）MR システム開発センターから提供して頂きました．また，研究を進めるにあたり数々の助言を頂いたキヤノン（株）MR システム開発センター 佐藤清秀様を始めとする同研究所の皆様に深く感謝します．

また，数々の助言を頂きました本学画像情報研究室卒業生の 菅谷保之先輩，尾関基行先輩，にもお礼を申し上げます．共同研究者として共に研究し，時にはよき相談相手となってくれた永井悠文君，立野圭祐君，に深く感謝いたします．また，同じ研究グループとして数多くの実験に協力して下さった中原守男君，中野学君に深く感謝いたします．最後に，研究を進めるにあたり数々の助言や議論を頂き，多くの実験に快く協力して下さった，本学画像情報研究室の皆様，OB・OGの皆様にも深く感謝致します．

参考文献

- [1] Y. Ohta, and H. Tamura, “Mixed Reality -Merging Real and Virtual Worlds-”, Ohmsha, Ltd. 1999.
- [2] 大島登志一, 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行, “RV-Border Guards : 複数人参加型複合現実感ゲーム”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.699-706, 1999.
- [3] O.Bimber and B.Frohlich, ”Occlusion Shadows: Using Projected Light to Generate Realistic Occlusion Effects for View-Dependent Optical See-Through Displays”, ISMR 2002, pp.186-195, Sep 31th - Oct 1st 2002.
- [4] 向川康博, 永井悠文, 大田友一, “SpaceRelighter:パターン投影による照明環境の再現”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.2, pp.155-162, Jun. 2005.
- [5] 武川直樹, “コミュニケーションにおける視線の役割”, 電子情報通信学会誌, Vol.85, No.10, pp.756-760, 2002.
- [6] A. Kendon, “Some functions of gaze direction in social interaction”, Acta Psychologica, 26, pp.22-63, 1967.
- [7] M. Argyle, R. Ingham, F. Alkena, and M. McCallin. “The different functions of gaze”, Semiotica, pp.10-32, Jul. 1973.
- [8] M. Cook, and J.M.C Smith, “The role of gaze in impression formation”, J.Soc. Clin. Psychol, 14, pp.19-25, 1975,
- [9] S. Baron-Cohen, “Mindblindness -An Essay on Autism and Theory of Mind”, MIT Press, 1995.
- [10] H. Ishii, and M. Kobayashi, “ClearBoard: A Seamless Medium for Shared Drawing and Conversation with Eye Contact”, Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '92), ACM SIGCHI, Monterey, 3-7 May 1992, pp. 525-532.
- [11] 森川治, “対話における視線認知特性の対面対話とビデオ対話の違い”, 計測自動制御学会, Progress in Human Interface, 6, pp.13-20, 1997.
- [12] 森川治, “遠隔視覚対話における人間特性の分析とその応用”, 人間科学研究, Vol.3, pp.17-28, 2001.

- [13] 清川清, マーク・ビリングハースト, ダニエル・ベルチャ, アナルブ・グプタ, “拡張現実感インターフェースを用いた対面協調作業のコミュニケーション過程”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.2, pp.159-168, 2002.
- [14] K. Kiyokawa, H. Takemura, and N. Yokoya, “SeamlessDesign: A Face-to-face Collaborative Virtual / Augmented Environment for Rapid Prototyping of Geometrically Constrained 3-D Objects”, Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems '99 (ICMCS '99), Vol.2, pp.447-453, Florence, 1999.
- [15] 宮里勉, “Puppet Eyes - Eye-through HMDの提案と対面コミュニケーションへの応用-”, 信学技報, CS98-1, pp.1-8, Apr. 1998.
- [16] E.A.Hoffman and J.V.Haxby, “Distinct representations of eye gaze and identity in the distributed human neural system for face perception”, Nature Neuroscience, Vol.3, No.1, pp.80-84, Jan. 2000.
- [17] 吉川左紀子, 佐藤弥, “社会的メッセージ検出機構としての顔知覚 表情と視線方向による促進”, 心理学評論, Vol. 43, No.2, pp.259-272, 2002.
- [18] 向川康博, 中村裕一, 大田友一, “複数の顔画像の組合せによる任意方向・任意表情の顔画像の生成”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J80-D-II, No.6, pp.1555-1562, Jun. 1997.
- [19] Y.Mukaigawa and Y.Ohta, “Face synthesis with arbitrary pose and expression from several images - an integration of image-based and model-based approach -” Asian Conference on Computer Vision, 1998.
- [20] L.Gao, Y.Mukaigawa, and Y.Ohta, “Synthesis of facial images with lip motion from several real views” Proc. of Third International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG'98), pages 181-186, April 1998.
- [21] H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto, and K. Tachibana, “Virtual object manipulation on table-top AR environment”, International Symposium on Augmented Reality, pp.111-119, 2000.
- [22] 内山晋二, 山本裕之, 田村秀行, “複合現実感のためのハイブリッド位置合わせ手法-6自由度センサとビジョン手法の併用-”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.1, pp.119-125, 2003.
- [23] 佐藤清秀, 田村秀行, “複合現実感における位置合わせ手法”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2002) 論文集 I, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, vol.2002, no.11, pp.I.61-I.68, July 2002.
- [24] C. Tomashi, and T. Kanade, “The factorization method for the recovery of shape and motion from image streams”, Proceedings of Image Understanding Workshop, pp.459-472, 1992.

- [25] D.Piponi, and G.Borshukov, “Seamless texture mapping of subdivision surfaces by model pelting and texture blending.” Siggraph 2000 Conference, 7:471–478, July 2000.
- [26] M. Bern and D. Eppstein, “Mesh Generation and Optimal Triangulation.”, In Computing in Euclidean Geometry, Lecture Notes on Computing, Vol.4 2nd Edition, World Scientific, pp.47-124, 1995.
- [27] 藤原義久, 澤井秀文, “進化的計算による 3 次元曲面の最適メッシュ生成”, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.5 pp.2338-2345, May. 1999.
- [28] 早川要, “シミュレーション技術の現状と今後”, デンソーテクニカルレビュー, 基調論文, Vol.5, No.1 pp.9-15, 2000.
- [29] M. Kanbara, T. Okuma, H. Takemura, and N. Yokoya. “A stereoscopic video see-through augmented reality system based on real-time vision-based registration.”, IEEE Virtual Reality International Conference(VR 2000), pp.255-262, Mar. 2000.
- [30] S.M.Anstis, J.W.Mayhew, and T.Morley, “The perception of where a face or television ‘ portrait ‘ is looking”, American Journal of Psychology, 82(4), pp.474-489, Dec. 1969.
- [31] Y.Kitamura, T.Konishi, S.Yamamoto, and F.Kishino, “Interactive Stereoscopic Display for Three or More Users” Siggraph 2001 Conference Proceedings, Computer Graphics Annual Conference Series 2001 pp.231-239
- [32] S.Prince, A. D. Cheok, F.Farbiz, T. Williamson, N. Johnson, M.Billinghurst,and H.Kato, “3D Live:Real Time Captured Content for Mixed Reality.” ISMR 2002, pp.7-13, Sep 31th - Oct 1st 2002.
- [33] Hall.E.T “かくれた次元”, 日高 敏隆, 佐藤 信行 訳,p160-181, みすず書房,1970
- [34] 杉田暉道, “続 統計学入門”, 医学書院, 1984.
- [35] 菅民郎, “Excel で学ぶ実験計画法～シックスシグマと重回帰分析～”, オーム社, 2002.
- [36] 杉原敏昭, 宮里勉, 中津良平, “焦点調節補償機能を有する HMD:3DDAC Mk.4”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.4, No.1, pp.261-268, 1999.
- [37] C. Load, and M. Haith, “The perception of eye contact”, Perception & Psychophysics, Vol.16(3), pp.413-416, 1974.
- [38] 真覚健, 丸山, 桐田隆博, “他者の視線方向の知覚”, 日本心理学会, 第 54 回発表論文集, pp.513, 1993.
- [39] Hill. H and Bruce. V, “The effect of lighting on the perception of facial surfaces.”, Journal of Experimental Psychology:Human Perception & Performance, 22, pp.986-1004. 1996.

- [40] 遠藤光男, “倒立顔の認識”, 心理学評論, 38, pp.539-562, 1995.
- [41] 高野陽太郎, “傾いた図形の謎”, 認知科学選書 11. 東京大学出版会. 1987.
- [42] Peter Thompson, “Margaret Thatcher:A new illusion.”, Perception, 9, pp.483-484. 1980.
- [43] Natsuki Sugano, Hirokazu Kato, and Keihachiro Tachibana, “The Effects of Shadow Representation of Virtual Objects in Augmented Reality”, International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.76-83, 2003.
- [44] 佐藤いまり, 佐藤洋一, 池内克史, “物体の陰影に基づく光源環境の推定”, 情報処理学会論文誌, Vol.41,No.SIG10, Dec. 2000.
- [45] Masayuki Kanbara, Naokazu Yokoya, “Geometric and Photometric Registration for Real-time Augmented Reality”, International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.279-280, 2002.
- [46] Kusuma Agusanto, Li Li, Zhu Chunagui, Ng Wan Sing, “Photorealistic rendering for augmented reality using environment illumination”, International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.208-216, 2003.
- [47] Paul E. Debevec, “Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-Based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography”, In SIGGRAPH 98, pp.189-198, Jul. 1998.
- [48] HDRshop, “High-dynamic range image processing tools.”, <http://gl.ict.usc.edu/HDRShop/>
- [49] R.R.Lewis, “Making shaders more physically plausible.”, in Fourth Eurographics Workshop on Rendering, pp.47-62, Jun. 1993.
- [50] 日本工業規格, “高精細カラーデジタル標準画像 (XYZ/SCID)”, JIS X 9204:2004, Dec. 2004.
- [51] 羽石秀昭, 明道正博, 三宅洋一, “ハードコピーにおける好ましい肌色再現 (I)”, 日本写真学会誌, 56(2), pp.123-127, 1993,
- [52] 浅田卓哉, 羽石秀昭, 三宅洋一, “ハードコピーにおける好ましい肌色再現 (II)”, 日本写真学会誌, 56(5), pp.399-402, 1994,
- [53] 小山壮二, 富川丈司, “デジタルカメラの完璧カラーマッチング”, グラフィック社, Mar. 2000.
- [54] Paul Debevec, Tim Hawkins, Chris Tchou, Haarm-Pieter Duiker, Westley Sarokin, and Mark Sagar, “Acquiring the Reflectance Field of a Human Face” Siggraph 2000 Conference Proceedings.

本研究に関連する論文

- [55] 竹村雅幸, 原口俊吾, 大田友一, “複合現実空間におけるインタラクティブ・インタラクション:BLADESHIPS”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.1, pp.119-127, 2005,
- [56] Y.Sato, M.Takemura, I.Kitahara, J.Hoshino, Y.Nakamura, Y.Ohta, “Visualizing Focus of Attention in Mixed Reality Community Space”, International Conference on Artificial reality and Telexistence, pp.141-146. 2001. Dec.
- [57] M. Takemura, and Y. Ohta, “Diminishing Head-Mounted Display for Shared Mixed Reality”, International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.149-156, 2002.
- [58] 竹村雅幸, 大田友一, “協調型複合現実空間のための人物映像加工によるアイコンタクトの復元”, 信学技報, Vol.102, No.554, PRMU2002-183, pp.85-90, Jan. 2003.
- [59] 竹村雅幸, 大田友一, “協調型複合現実空間のための顔映像生成による視線情報の復元”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp.313-321. Sep. 2005.
- [60] 竹村雅幸, 大田友一, “協調型複合現実空間のためのアイコンタクトの復元～視線認知実験による評価～”, 信学技報, Vol.103, No.584, PRMU2003-189, pp.19-24, Jan. 2004.
- [61] M.Takemura,Y.Ohta,“Generating High-Definition Facial Video for Shared Mixed Reality”, IAPR Conference on Machine Vision Applications, pp.422-425. May. 2005.
- [62] 竹村雅幸, 大田友一, “協調型複合現実空間における視線情報再現のための高精細顔映像生成”, 画像の認識・理解シンポジウム, MIRU2005, Jul. 2005.
- [63] 立野圭祐, 竹村雅幸, 大田友一, “協調型複合現実空間における視線認知特性を考慮した視線提示”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp.353-361. Sep. 2005.

公表論文リスト

国内論文誌

1. 竹村雅幸, 大田友一, ”協調型複合現実空間のための顔映像生成による視線情報の復元”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol . 10 , No . 3 , pp.313-321. Sep . 2005.
2. 立野圭祐, 竹村雅幸, 大田友一, ”協調型複合現実空間における視線認知特性を考慮した視線提示”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol . 10 , No . 3 , pp.353-361. Sep . 2005.
3. 竹村雅幸, 大田友一, ”協調型複合現実空間のためのアイコンタクトの復元～視線認知実験と顔映像の高精細化～”, 情報科学技術レターズ, FIT2004, LK-003, pp.243-246, Sep. 2004.(FIT ヤングリサーチャー賞)
4. 竹村雅幸, 原口俊吾, 大田友一, ”複合現実空間におけるインタラクティブ・アトラクション:BLADESHIPS”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol . 10 , No . 1 , pp.119-127. March . 2005.

査読付論文 (国際学会)

1. K.Tateno, M.Takemura, Y.Ohta, ”Enhanced Eyes for Better Gaze-Awareness in Collaborative Mixed Reality”, IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2005), Oct, 2005.
2. K.Tateno, M.Takemura, Y.Ohta, ”Enhanced Eyes for Better Gaze-Awareness in Mixed Reality”, Siggraph Sketches 2005, DVD, Aug. 2005.
3. M.Takemura, Y.Ohta, ”Generating High-Definition Facial Video for Shared Mixed Reality”, IAPR Conference on Machine Vision Applications, pp.422-425. May. 2005.
4. M.Takemura, S.Haraguchi, Y.Ohta, ”An Interactive Attraction in Mixed Reality -BLADESHIPS-”, Virtual System MultiMedia 2004 , Hybrid Realities and Digital Partners, pp.1152-1158, Nov, 2004.
5. M.Takemura, S.Haraguchi, Y.Ohta, ”BLADESHIPS -An Interactive Attraction in Mixed Reality-”, SIGGRAPH2004 Sketches, DVD, Aug, 2004.

6. M.Takemura,S.Haraguchi, "BLADESHIPS:An Interactive Attraction in Mixed Reality", IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2003), Demonstrations, pp.356-357, Oct, 2003 ,
7. H.Nagai, M.Takemura, Y.Ohta, "Facial Action Boundary: Image-Based Real-Time 3D Facial Animation", SIGGRAPH Sketches, Jul, 2003,
8. M.Takemura,Y.Ohta, "Diminishing Head-Mounted Display for Shared Mixed Reality", IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2002), pp.149-156. Oct. 2002.
9. M.Takemura,Y.Ohta, "Diminishing Head-Mounted Display for Shared Augmented Reality", Siggraph2002 Sketches, pp.168, Jul. 2002.
10. Y.Sato, M.Takemura, I.Kitahara, J.Hoshino, Y.Nakamura, Y.Ohta, "Visualizing Focus of Attention in Mixed Reality Community Space", International Conference on Artificial reality and Telexistence, pp.141-146. 2001, Dec.

その他の公表論文

1. 竹村雅幸, 大田友一, "協調型複合現実空間における視線情報再現のための高精細顔映像生成～", 画像の認識・理解シンポジウム, MIRU2005, Jul. 2005.
2. 竹村雅幸, 大田友一, "協調型複合現実空間のための顔映像生成によるアイコンタクトの復元", 電子情報通信学会 2004 年度総合大会 D-12-167 pp.333. Mar. 2004.
3. 竹村雅幸, 大田友一, "協調型複合現実空間のためのアイコンタクトの復元～視線認知実験による評価～", 信学技報, Vol.103, No.584, PRMU2003-189, pp.19-24, Jan. 2004.
4. 永井悠文, 竹村雅幸, 大田友一, "Facial Action Boundary ～表情を持つ自由視点顔映像のリアルタイム生成～", 情報科学技術フォーラム, FIT2003, LJ-004, pp.217,218, Sep. 2003.
5. 竹村雅幸, 大田友一, "協調型複合現実空間のための人物映像加工によるアイコンタクトの復元", 信学技報, Vol.102, No.554, PRMU2002-183, pp.85-90, Jan. 2003.
6. 竹村雅幸, 大田友一, "複合コミュニティ空間における人物映像加工によるアイコンタクトの復元", 日本 VR 学会 第 6 回全国大会 pp.243-246, Sep. 2001.

受賞など

1. FIT2004 第 3 回情報処理科学技術フォーラム ヤングリサーチャー賞 受賞, Sep. 2005.
竹村雅幸, 大田友一, "協調型複合現実空間のためのアイコンタクトの復元～視線認知実験と顔映像の高精細化～", 情報科学技術レターズ, FIT2004, LK-003, pp.243-246, Sep. 2004.

2. 平成 16 年度，第 10 回学生 CG コンテスト [インタラクティブ部門] 優秀賞受賞,Jan. 2005.
竹村雅幸，原口俊吾，“BLADESHIPS”，

付録

- NDI 製 3次元運動計測システム OPTOTRAK 3020 仕様 (表 9.1)
- ISCAN 製 視線検出機構 System 4000/C (表 9.2)
- CANON 製 頭部装着型ディスプレイ (表 9.3)
- MINOLTA 製 非接触 3次元デジタイザ VIVID 910 (表 9.4)

表 9.1: OPTOTRAK 3020 仕様

位置センサ	寸法	1110mm×315mm×215mm
	センサ重量	約 40kg
	ブラケット重量	約 5kg
	消費電力	80W
	電源	100/120/220/240VAC, 50/60Hz
	サンプリング速度	3000Hz(未加工データ), 1200Hz(3D データ)
CCD センサ仕様	レンズタイプ	アナモルフィック
	計測視野	34 °×34 °
	分解能	1:200,000
	誤差	0.005%
システム制御装置	寸法	483mm×373mm×138mm
	重量	約 10.9kg
	消費電力	40W
	電源	100/120/220/240VAC, 50/60Hz

表 9.2: 視線検出機構 System 4000/C 仕様

システム内容	単眼接触式 注視点計測
眼球運動分解能	± 0.25° 以下 (標準)
注視点計測精度	視野角 ± 20° ~ ± 25° で ± 0.5° (標準) [System 1000/C は除く]
サンプリングレート	60Hz. (オプションで 60Hz, 120Hz, 240Hz 可変対応可能)
入力ビデオ信号	眼球画像追跡システム, 自動校正システム, 各システムに対して NTSC コンポジット
眼球運動データ出力	ソフトウェアにより瞳孔位置座標, 瞳孔径, 角膜反射位置座標, 瞳孔位置 - 角膜反射位置, 注視点座標, 等設定可能ただし, System 1000/C は瞳孔位置座標, 瞳孔径データのみ
シリアル通信機能	データ出力機能 ソフトウェアにより 6 パラメータまで出力可能 データ入力機能 データ記録開始, 中止, データ注記機能
データ取得・解析機能	データリストの表示, 停留点の抽出, 軌跡の描画, その他グラフィクス機能
水平瞳孔中心位置座標	(0 ~ 511 マトリクス)
垂直瞳孔中心位置座標	(0 ~ 255 マトリクス)
水平瞳孔径, 垂直瞳孔径	(画素数)
水平角膜反射点位置座標	(0 ~ 511 マトリクス)
垂直角膜反射点位置座標	(0 ~ 255 マトリクス)
水平瞳孔中心位置座標	水平角膜反射点位置座標データ
垂直瞳孔中心位置座標	垂直角膜反射点位置座標データ

表 9.3: Coaster 仕様

HMD 本体	視野角：水平方向	51 度
	視野角：垂直方向	37 度
	重量	327 g
	表示解像度	VGA (640 × 480 画素)
	カメラ入力	NTSC
カメラ仕様	有効画素	水平：768 画素 垂直：494 画素
	有効撮像面積	水平：6.54 mm 垂直：4.89 mm
	走査方式	2:1 インタレース
	走査周波数	水平：15.734 kHz 垂直：59.94 kHz
	同期方式	内部同期 / 外部同期 (自動切替)
	解像度	水平：470TV 本以上 垂直：350TV 本以上
	標準被写体照度	60 lx (F1.6 3000K)
	最低被写体照度	5 lx (F1.6 3000K)

表 9.4: 非接触 3次元デジタイザ VIVID 910 仕様

測定方式	三角測量 光切断方式
AF	像面 AF(コントラスト法), アクティブ AF
受光レンズ(交換式)	TELE: 焦点距離 f=25mm MIDDLE: 焦点距離 f=14mm WIDE: 焦点距離 f=8mm
画像入力対象設置範囲	0.6~2.5m (WIDE レンズは 2m)
測定入力対象設置範囲	0.6~1.2m
レーザクラス	クラス 2 (IEC60825-1), クラス 1 (FDA)
レーザスキャン方式	ガルバノミラー方式
x 方向入力領域 (距離により変化する)	TELE: 111~463mm, MIDDLE: 198~823mm WIDE: 359~1196mm
y 方向入力領域 (距離により変化する)	TELE: 83~347mm, MIDDLE: 148~618mm WIDE: 269~897mm
z 方向入力領域 (距離により変化する)	TELE: 40~500mm, MIDDLE: 70~800mm WIDE/FINE モード時: 110~750mm
確度	X: ± 0.22mm, Y: ± 0.16mm, Z: Z 基準面に対し ± 0.10mm (FINE モード時/当社条件による)
精度 (Z, °, Typ)	± 0.008mm (高信頼性モード時/当社条件による)
入力時間	0.3 秒 (FAST モード時) 2.5 秒 (FINE モード時) 0.5 秒 (COLOR)
ホストコンピュータ への転送時間	約 1 秒 (FAST モード時) 1.5 秒 (FINE モード時)
入力可能環境光	500 lx 以下
撮像素子:3次元データ 撮像素子:カラーデータ	1/3 インチ 34 万画素フレームトランスファ CCD 3次元データを共通 (回転フィルタによる色分解方式)
出力画素数:3次元データ	640 × 480 (FINE モード時), 320 × 240 (FAST モード時)
出力画素数:カラーデータ	640 × 480
出力フォーマット	3次元データ:独自フォーマット カラーデータ:RGB24ビットラスタスキャンデータ
データ容量	FAST モード時 3次元データとカラーデータ合わせて 1.6MB/1 枚 FINE モード時 3.6MB/1 枚
電源	AC 商用電源 100-240V (50-60Hz) 定格 0.6A (100V AC 入力時)
外形寸法	213 (幅) × 413 (高さ) × 271 (奥行) mm
質量	約 11kg