

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors



清川 清 (Kiyoshi KIYOKAWA, Dr. Eng.)

大阪大学サイバーメディアセンター准教授

(Cybermedia Center, Associate Professor, Osaka University)

日本バーチャルリアリティ学会 理事 ヒューマンインタフェース学会 評議員 IEEE ACM 電子情報通信学会 情報処理学会 会員

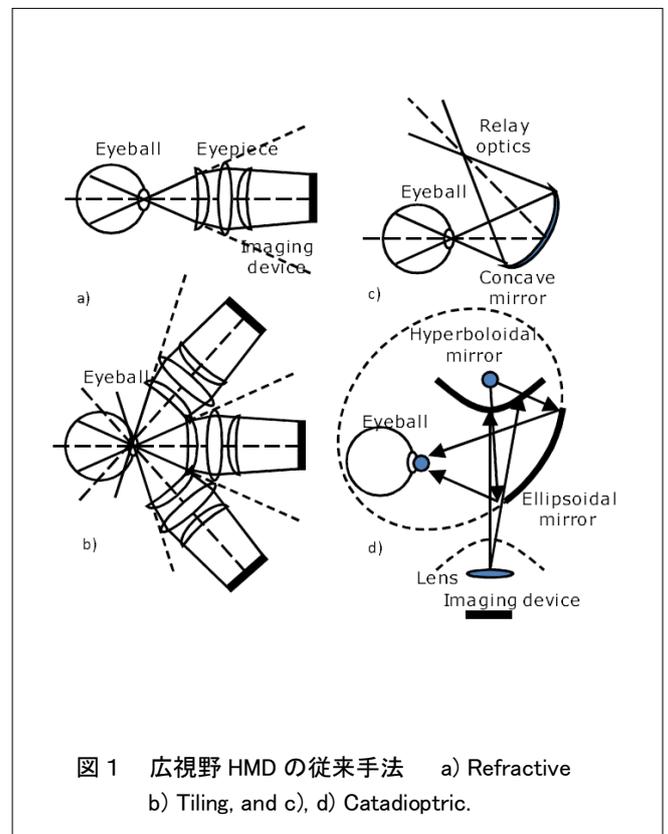
受賞: Elsevier Computer Graphics Best Paper Award 電気通信普及財団賞 情報化月間推進会議議長表彰 日本バーチャルリアリティ学会貢献賞 IEEE SAINT Best Paper Award ACM VRST Best Paper Award ICAT Best Paper Award 他

著書: プロジェクターの最新技術 プロジェクターの技術と応用 プロジェクターの最新技術 II (以上 シーエムシー出版) Emerging Technologies of Augmented Reality (Idea Group, Inc.) バーチャルリアリティ学 (工業調査会) 映像情報メディア工学総合大辞典 (オーム社) Handbook of Visual Display Technology (Springer) 以上 共著
研究専門分野: 人工現実感 拡張現実 3次元ユーザインタフェース

あらし 広視野映像は VR (Virtual Reality) 環境における没入感の向上、状況認識や探索的タスクにおける頭部運動の軽減や探索時間の削減等に有益である⁽¹⁾。しかし一般の頭部搭載型ディスプレイ (HMD : Head Mounted Display) は 20~40[度]程度の水平視野角しかなく、広視野化には技術的困難が伴う⁽²⁾。従来広視野 HMD を実現するいくつかの手法が知られているが、それぞれに欠点がある。屈折光学系は古典的な HMD に多く見られるが⁽³⁾、視野角の増大と共に光学歪みが顕著となり複合現実感用途などで重要な光学透過性を持たせることも難しい。複数の光学系を縦横に並べるタイリング手法もよく採用されるが^{(1),(4)} (図 1 b)、製造コスト、重量、ディスプレイ間の継ぎ目、色調の不均一などが問題となり、光学透過性の提供も困難である。Off-axis 反射屈折光学系は、重く複雑になる傾向がある⁽⁵⁾ (図 1 c)。長原らの双曲面ミラーと楕円ミラーを用いたデザインは 180 × 60[度]の視野を実現するが⁽⁶⁾ (図 1 d)、射出瞳が極めて小さいという問題がある。本研究では、これら従来手法の問題点の多くを解決する新たな HMD およびそれに適したレンダリング手法と輝度ムラ補正手法について検討する。

1. はじめに

広視野映像は VR (Virtual Reality) 環境において没入感の向上に寄与するだけでなく、状況認識や探索的タスクにおいて頭部運動の軽減や探索時間の削減に有益である⁽¹⁾。しかし一般の頭部搭載型ディスプレイ (HMD : Head Mounted Display) は 20~40[度]程度の水平視野角しかなく、広視野化には技術的困難が伴う⁽²⁾。従来広視野 HMD を実現するいくつかの手法が知られているが、それぞれに欠点がある。屈折光学系は古典的な HMD に多く採用されており、代表的な例として約 110 × 55[度]の視野を提供する The LEEP 光学系が知られている (図 1 a)⁽³⁾。しかし、屈折光学系は視野角の増大と共に光学歪みが顕著となり複合現実感用途などで重要な光学透過性を持たせることも難しい。また接眼レンズの口径を眼幅以上にはできないため、例えば、180[度]を越える視野の提供は困難である。複数の屈折光学系を縦横に並べ全体として広視野映像を提供する (タイリング) 手法もよく採用されるが^{(1),(4)} (図 1 b)、製造コスト、重量、ディスプレイ間の継ぎ目、色調の不均一などが問題となり、光学透



双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors

過性の提供も困難である。Off-axis 反射屈折光学系は、リレー光学系から凹面鏡に映像を投影する方式であるが、リレー光学系が重く複雑になる傾向がある(図1c)⁵⁾。長原らの双曲面ミラーと楕円ミラーを用いたデザインは180×60[度]の視野を実現するが(図1d)⁶⁾、眼に近接した楕円ミラー面の焦点に集光する光束を観察する必要があり、射出瞳が極めて小さいという問題がある。すなわち、眼球をスイートスポットから動かすと映像がケラれて暗くなるため、実用上正面方向しか注視できない。

本研究では、これら従来手法の問題点の多くを解決する新たなHMDについて検討する。2章で基本アイデアを示し、3章で設計の際の検討事項について述べる。4章では設計支援のために開発したシミュレータについて述べ、5章では実際に試作したベンチトップ型試作ディスプレイおよび、コンテンツを描画するためのレンダリング手法について述べる。6章では頭部搭載型試作ディスプレイおよび、輝度ムラを補正する手法について述べる。

2. 基本アイデア

本研究では、双曲面ハーフミラーを用いた頭部搭載型プロジェクタ(HMPD: Head Mounted Projective Display)について検討する。一般のHMPD⁷⁾(¹⁴⁾ではプロジェクタを頭部に搭載し、眼前の光学コンバイナを介して実環境側に映像を投影する。一部を除き⁸⁾、実環境には適宜再帰反射スクリーンを配置し、利用者はこの反射映像を光学コンバイナ越しに観察する。HMPDは、接眼光学系に関わる光学歪みやステレオ視領域の狭さなどの問題がなく、スクリーンの距離をコンテンツに合わせれば輻輳調節矛盾も緩和できるなどの利点がある。ただし、従来のHMPDの視野角は、プロジェクタの投影画角と一致するため、一般的には60[度]程度が上限であった。提案手法では、平面ではなく曲面のミラーを用いてプロジェクタの投影画角より広範囲に映像を投影する。曲面ミラー上で各方位に反射した光が再帰反射スクリーン上で向きを反転し、最終的に曲面ミラーの内側のある1点(利用者の観察視点)に集光するためには、ミラー形状を二葉双曲面(の一方)とし、その外部焦点にプロジェク

タの投影中心を、その内部焦点に観察視点をそれぞれ配置すればよい。このようなレイアウトは、コンピュータビジョンの分野では全方位カメラとして古くから利用されている⁽¹⁵⁾が、双曲面ミラーを半透過にして映像装置に利用した例は知られていない。以降、このディスプレイデザインをHyperbolic HMPDもしくはHHMPDと呼ぶ。

図2に提案ディスプレイの概要を示す。利用者の両眼に対応して二つの双曲面ハーフミラーを設け、それらの外側焦点に配置したプロジェクタでステレオ投影を行う。光軸は水平面から傾け、プロジェクタ自身が視界の妨げとなることを防ぐ。投影映像を適切に歪ませておくことで、歪みのない広視野映像を観察できる。HMPD本来の利点を含む、本手法の主な特長を以下に列挙する。

大きな射出瞳

HHMPDでは、利用者から離れた再帰反射スクリーン(通例1~3[m]程度の距離)に投影された映像を観察するため、従来の広視野HMD、特に反射屈折型に比べ眼球運動に対する映像入射角の変化が小さい。したがって、視線方向に拠らず鮮明な広視野映像を観察できる。

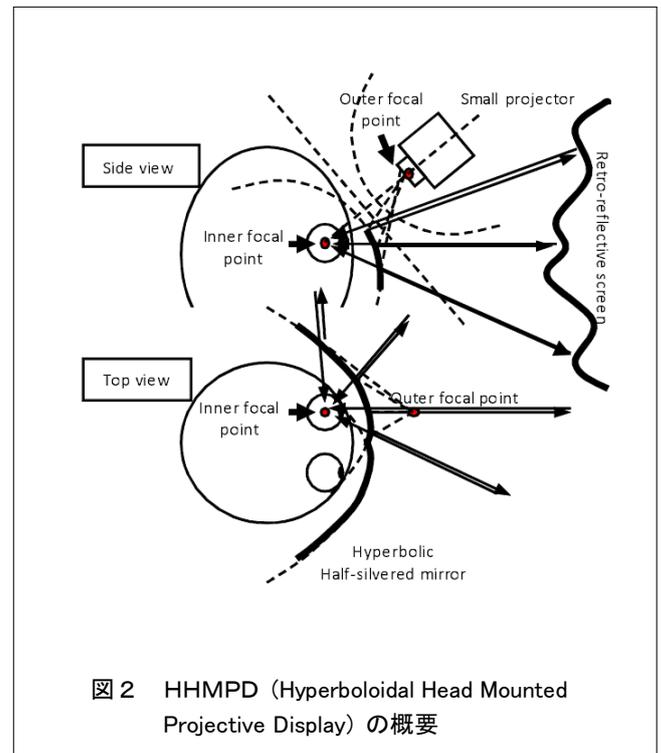


図2 HHMPD (Hyperboloidal Head Mounted Projective Display) の概要

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors

シンプルな構成

HHMPD はプロジェクタを除いて一組のハーフミラーのみで構成され、従来の広視野 HMD より構成や組み立てが簡単である。また、従来の HMPD より小さいミラーサイズでより広い視野角が得られる。曲面形状のために顔面にフィットしたゴーグル様となりデザイン的にも有利である。

広いステレオ視領域

従来の多くの広視野 HMD では 60[度] 程度と限られていたステレオ視野が、HHMPD では最大 130[度] 程度得られる。

その他のHMPD由来の特長

HHMPD は HMPD のその他の多くの利点をそのまま継承する。例えば、接眼光学系に起因する光学歪みの問題がない点、光学透過性を備える点、輻輳調節矛盾の緩和された映像投影が可能などである。

多様な応用

HHMPD は CAVE 等の没入型投影ディスプレイの置き換えとして利用でき、さらにそれらと異なり、多人数対応が容易である。また、プロジェクタをカメラに置換（もしくは光学共役な位置に追加）すれば利用者自身が観察する実環境映像を超広視野で撮影できる。この設定は利用者行動解析や視線インタフェースなどへの応用が見込める。一方、本手法の主な欠点は以下の通りである。

低解像度

広視野の映像を単一のプロジェクタでまかなうため、それに伴い投影される映像の角度分解能は低下する。

映像歪み

双曲面ハーフミラーを介することにより投影映像には歪みが生じる。ただし、この歪みは投影される映像ソースをあらかじめ適切に歪ませることで実質的に解消可能である。その手法については、5.2節にて述べる。

焦点ボケ

プロジェクタ、双曲面ミラー、および再帰反射スクリーンが構成する光学系では像面自体が大きく湾曲した曲面となるため、平面への投影を仮定

した一般のプロジェクタではスクリーン全域に焦点の合った投影ができない。

映像シフト

双曲面ハーフミラーによる屈折のため、投影映像を含む実環境全体がやや歪み、特に横方向にシフトして観察される。

3. デザイン検討

二葉双曲面は一般に以下の式(1)で与えられる。HHMPD の設計に際しては、ミラーパラメタ a、b 間に以下に述べるトレードオフがある。図3に主なパラメタの関係を示す。

$$\frac{x^2+y^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

アイリリーフ ER はおよそ以下の式(2)で与えられる。眼鏡を着用した利用者を考慮すれば ER は 20[mm] 以上である必要がある。すなわち、この場合 a は大きいほうがよい。

$$ER = \sqrt{a^2 + b^2} - b \quad (2)$$

ミラー頂点とプロジェクタの距離 PMD は、以下の式(3)で与えられる。PMD はディスプレイサイズに直結し、実用的には 200[mm] 以下がよい。すなわち、

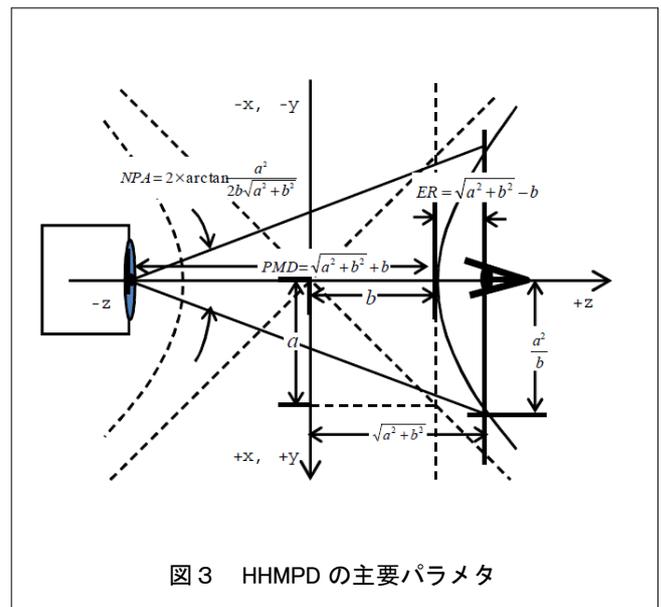


図3 HHMPD の主要パラメタ

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors

aは小さいほうがよい。

$$PMD = \sqrt{a^2 + b^2} + b \quad (3)$$

両眼視野 180[度]を得るには、耳側の視野が真横に達する必要がある。これに必要なプロジェクタの投影画角 NPA は以下の式(4)で与えられる。市販のプロジェクタを利用する場合、NPA は約 60[度] 以下でなければならない。すなわち、a は小さいほうがよい。

$$NPA = 2 \times \arctan \frac{a^2}{2b\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (4)$$

HHMPD のパラメタはこれらの事項を勘案して選択する必要がある。図4にパラメタ b を 50[mm]とした場合のパラメタ a および ER、PMD、NPA の関係を示す。ER を 20[mm] 以上、PMD を 200[mm] 以下、NPA を 60[deg] 以下とする条件を満たすためには、図中の直線 1 よりも右かつ直線 2 および 3 より左の領域内であればならない。すなわち、a は凡そ 49~70[mm] の範囲内である必要があることがわかる。同様に、パラメタ a と b の選択可能な範囲を図5に示す。パラメタ a と b は柔軟に選択できず、限られた組合せしか許されることがわかる。また、パラメタ b を 25、50、75、100[mm] とした場合のパラメタ a の選択可能な範囲の具体的な数値を表1に示す。

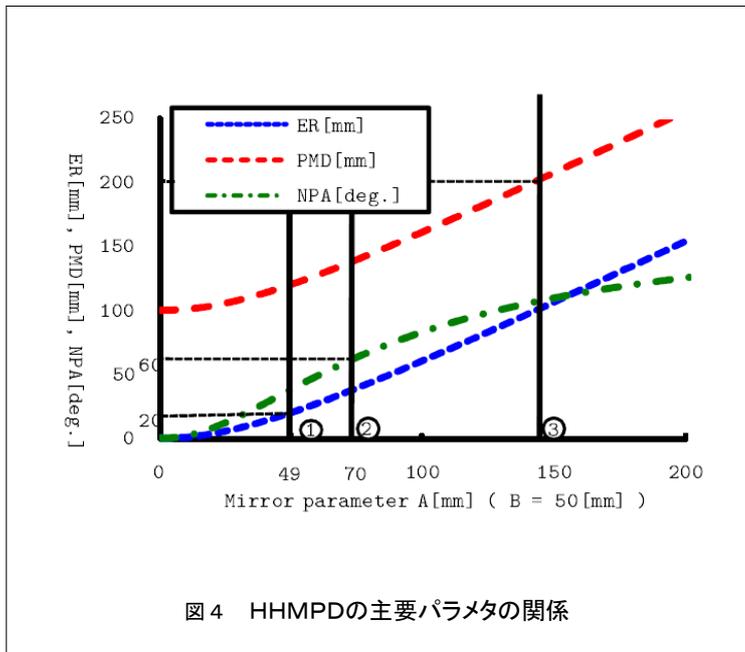


図4 HHMPDの主要パラメタの関係

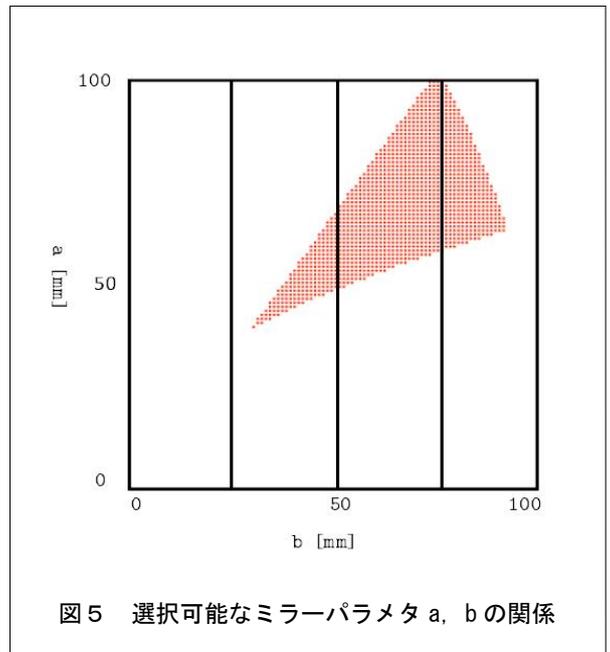


図5 選択可能なミラーパラメタ a, b の関係

表1 パラメタ b に対するパラメタ a の選択可能範囲

b [mm]	a [mm] for ER > 20 [mm]	a [mm] for PMD < 200 [mm]	a [mm] for NPA < 60 [deg]	a [mm] satisfying ER, PMD and NPA
25	35.7 <	173.2 >	35.3 >	N/A
50	49.0 <	141.4 >	70.7 >	49.0~70.7
75	58.4 <	100.0 >	106.0 >	58.4~100.0
100	66.4 <	N/A	141.4 >	N/A

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors

4. HHMPDシミュレータ

HHMPD の設計支援のために HHMPD シミュレータを開発した。ミラーパラメタ a, b およびプロジェクタの投影画角を変更して、投影フラスタム、観察フラスタム、水平・垂直の視野角などの変化を確認できる。

図 6 に同シミュレータの画面例を示す。図 6 a はパラメタ a, b、水平投影画角をそれぞれ 70[mm]、50[mm]、31.0[度] とした例であり、水平・垂直の視野角がそれぞれ 97.1[度] と 70.0[度]、水平ステレオ視野角 87.0[度] になることがわかる。図 6 b、c、d は同様の状況でパラメタ a を 50[mm] とした場合を示す。パラメタ a が 20[mm] 短くなったことで、水平・垂直の視野角はそれぞれ 146.2[度] と 89.8[度] に、水平ステレオ視野角は 135.1[度] に拡大している。図 6 e では、さらに水平投影画角を 50.3[度] に広げた場合の例であり、水平視野角が 171.2[度] に拡大している。図 6 f ではパラメタ a, b をそれぞれ 75.0[mm] と 85.0[mm] に増加し、水平視野角 189.7[度]、ステレオ視野角 119.1[度] を達

成している。

5. ベンチトップ型試作システムを用いたレンダリング手法の開発と評価

5.1 ベンチトップ型試作システム

図 7 に、提案手法の有効性を確認するために製作したベンチトップ型試作システムを示す。ミラーパラメタ a, b は共に 50[mm] とし、メタアクリル透明インゴット材を用いて製作した。反射面は AL+SiO コーティングとし、反射率は 52[%] である。プロジェクタとしては、LED 照明を用いた軽量小型の東芝 TDP-FF1AJ を用いた (解像度 SVGA、投影画角 31.0[度] × 22.2[度])。ミラーおよびプロジェクタは左眼・右眼用として二つずつ使い、ステレオ視を可能にしている。一方、プロジェクタを二つ搭載するにあたり、相互の干渉を避ける目的で全反射の一次ミラーを導入している。また、再帰反射スクリーンとしては 3M スコッチ ライトハイゲイン反射シート 7610 を用いた。

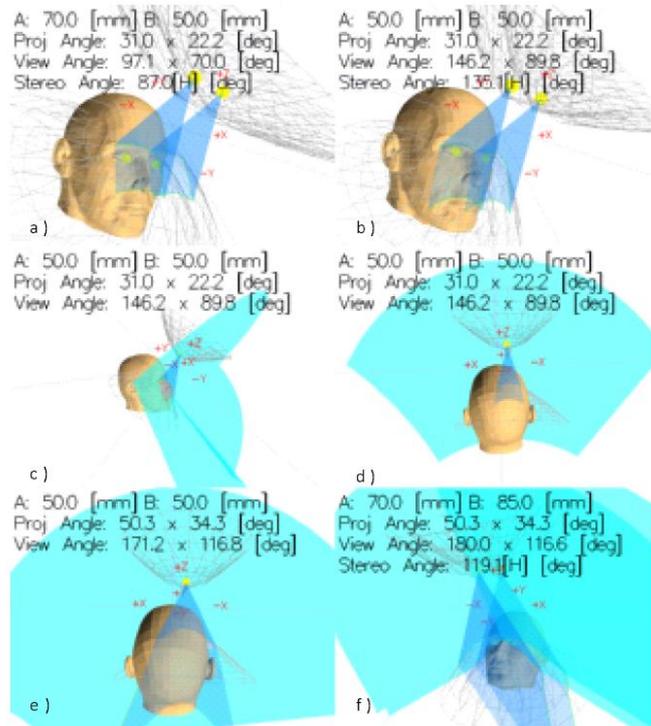


図 6 HHMPDシミュレータの画面例

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors



図7 ベンチトップ型試作システム

5.2 レンダリング手法

HHMPD 試作機を用いて、実際に広視野でバーチャル空間を投影するレンダリングアルゴリズムを実装した。具体的には、キューブマッピングに似た次のようなマルチパスレンダリングの手法を採用した。

- (1) 正面・左右の3方向について、それぞれ水平画角・垂直画角 90 度の領域の直角三角形からなるポリゴンメッシュを作成する。
- (2) ポリゴンメッシュを全方位画像と平面透視投影画像の関係式⁶⁾を用いて適切に変形させる。
- (3) 正面・左右の3方向のシーンを、水平画角・垂直画角 90 度を対象としてフレームバッファに描画する。
- (4) (3)で描いたシーンをテクスチャとして使い、(2)にて変形させたポリゴンメッシュ上に描画する。

ポリゴンメッシュは各頂点のみを変換式にしたがって正確にマッピングし、メッシュを構成する各三角形内はそれぞれの3頂点からのバイリニア補間を施し描画する。これにより、計算コストの高い頂点の変換処理を削減することになり、計算機の処理の軽減につながる。また、この補間処理により、本来のマッピング位置との誤差が生じるが、これはメッシュを十分に密にすることで、許容範囲に抑えられることを、5.3節にて示している。加えて、(1)において3方向のシーンを描画する際、その対象をテクスチャにバインドされたフレームバッファオブジェクト(FBO)とすることもまた処理の高速化を図っている。

5.3 結果と考察

本システムによって得られた視野角、処理速度および投影画像の品質について述べる。なお、描画に使用したPCのスペックは、CPU: Core2Duo 3.0 GHz、RAM: 2 GB、GPU: NVIDIA GTX 260 である。また、OpenGLを用いて実装し、33069 ポリゴンのシーンをSVGA (800 × 600) 解像度でステレオ描画した場合を示している。

(1) 視野角

ミラーパラメタ a, b が 50[mm]、プロジェクタの水平投影画角 31.0[度] の条件下での水平視野角については、4章にてシミュレータにより 146.2[度] と算出した。だが、試作機では顔面や固定具との干渉を防ぐなどの目的で、ミラーを一部カットしている。また、一次ミラーによりプロジェクタの投影光が一部ケラれる。そこで、本試作機での実際の投影光を計測し、水平視野角を算出した。図8は、左眼映像のみ投影した様子を魚眼カメラ Sony ExView (画角 180[度]) により撮影したものである。また、この際の観察眼とスクリーンの位置関係および、投影光の及ぶ領域を図9に示した。投影領域は図中にて灰色で示している。右眼のシステムは左眼と左右対称な関係に取り付けられているため、両眼視野は実際に図10のようになる。実際に、試作機が水平視野 126.0[度]、ステレオ視野 99.0 [度] を達成していることを確認した。

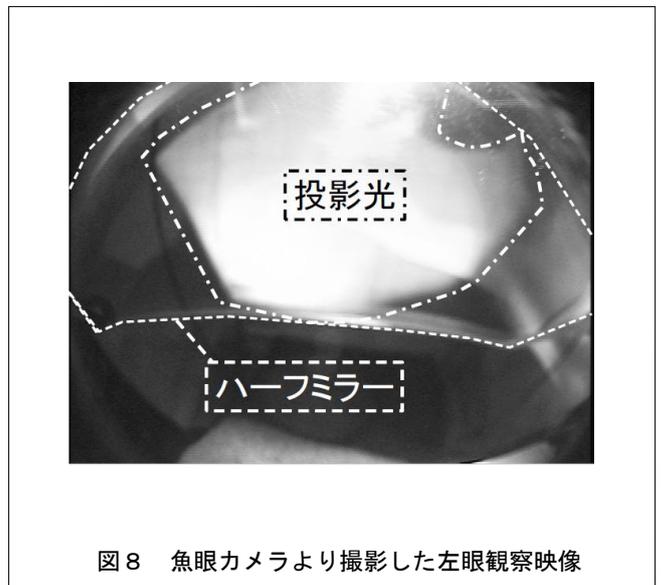


図8 魚眼カメラより撮影した左眼観察映像

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors

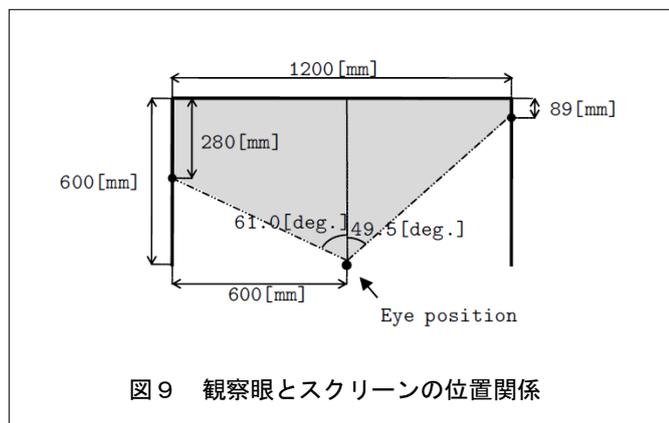


図9 観察眼とスクリーンの位置関係

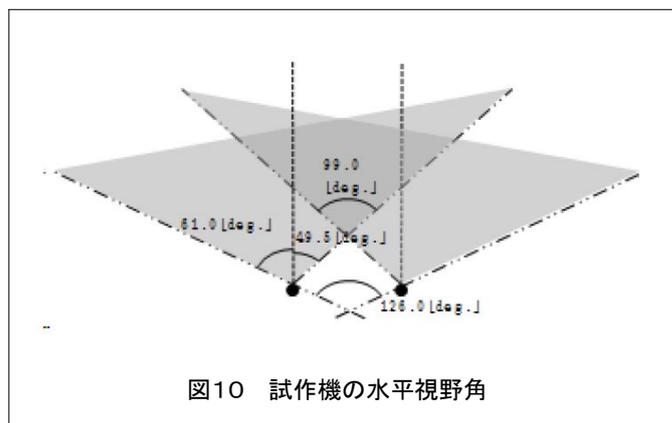


図10 試作機の水平視野角

(2) 処理速度

処理速度 (frames/sec) について、テクスチャサイズおよびそのポリゴン分割数との関係を表2に示した。処理速度に関して、いずれの条件においても frames/sec は十分な値を示していることがわかる。

(3) 映像品質

バイリニア補間を用いての歪み補正の精度について、テクスチャサイズおよびそのポリゴン分割数との関係を表3に示した。ポリゴンサイズを 8×8 [pixel] 以下の直角二等辺三角形に抑えることで誤差を十分に小さく

表2 ポリゴンメッシュのパラメタと処理速度の関係

テクスチャサイズ[pixel]	分割数	frames/sec
256 × 256	32 × 32 × 2	179.67
	64 × 64 × 2	146.33
	128 × 128 × 2	81.14
512 × 512	32 × 32 × 2	162.57
	64 × 64 × 2	141.95
	128 × 128 × 2	68.66
1024 × 1024	32 × 32 × 2	170.74
	64 × 64 × 2	141.91
	128 × 128 × 2	61.66
2048 × 2048	32 × 32 × 2	96.22
	64 × 64 × 2	84.73
	128 × 128 × 2	58.76

表3 ポリゴンメッシュのパラメタと補間精度の関係

テクスチャサイズ[pixel]	分割数	$(\Delta x_{\max}, \Delta y_{\max})$
256 × 256	32 × 32 × 2	(1, 1)
	64 × 64 × 2	(1, 1)
	128 × 128 × 2	(1, 1)
512 × 512	32 × 32 × 2	(2, 2)
	64 × 64 × 2	(1, 1)
	128 × 128 × 2	(1, 1)
1024 × 1024	32 × 32 × 2	(5, 5)
	64 × 64 × 2	(2, 2)
	128 × 128 × 2	(1, 1)
2048 × 2048	32 × 32 × 2	(19, 19)
	64 × 64 × 2	(5, 5)
	128 × 128 × 2	(2, 2)

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors

くできることがわかる。また、テクスチャサイズ 512 × 512[pixel]、分割数 32 × 32 × 2 の元でのレンダリング結果と、それを再帰反射スクリーンに投影した映像を双曲面ハーフミラー越しに撮影した様子を図11に示す。これより、ミラーによる歪みが概ね正しく補正されていることがわかる。

また、観察位置のずれやプロジェクタ取り付け位置のキャリブレーション誤差、再帰反射スクリーンでの反射光の拡がりなどの影響により、投影映像にクロストークが発生することがある。図12は、左プロジェクタより鉛直・水平方向に直線を引いた網目模様を、右プロジェクタからはそれを 45[度]回転したものを、600[mm]離れたスクリーンに投影して、映像を観察したものである。左眼映像からは鉛直・水平に直線が引かれたグリッドのみが観察されることが望ましいが、実際には図中に右眼に投影した映像である 45[度]回転したグリッドが観察できる。一方、右眼映像ではクロストークはほとんど見られない。これは、適切な特性を持つ再帰反射スクリーンを用いる、装置に適切なキャリブレーションを施す、適切な位置で観察できるように調節・固定する機構を取り付けるなどの方法で改善が可能である。幾何歪みやクロストークの他に、色にじみや焦点ボケ、輝度の不均一といった現象も観察されている。

6. 頭部搭載型試作システムを用いた輝度補正手法の開発と評価

6.1 頭部搭載型試作システム

図11に、新たに試作した頭部搭載型システムを示す。用いる双曲面ミラーはベンチトップ型試作システムのを流用した。光源として、マイクロプロジェクタ(3M MPro110、解像度 VGA、投影画角 17.7[度] × 14.4[度])を備えている。これらのミラーおよびプロジェクタは左眼・右眼用として2つずつ用いることでステレオ視を可能にし、水平視野角 109.5[度]を供する。頭頂部には赤外線トラッカ(3rdTech HiBall-3100)を搭載し、また周辺環境には再帰反射スクリーンと(3M スコッチライトハイゲイン反射シート 7610)を配している。



図11 頭部搭載型試作システム

6.2 輝度補正手法

HHMPD の投影映像には再帰性反射スクリーンや双曲面ミラーに由来する幾何歪みが観察される。輝度の不均一が発生する要因として次のものが挙げられる。

光路長の不均一

光源から射出された光が目へ届くまでの経路は、射出するその角度により異なる。これにより、空気中や光学系の伝達による減衰量に差異が生じる。

光学系上での反射特性

光はハーフミラーや再帰反射スクリーンなどに様々な角度で入射し、数度の透過・反射を経て目に至る。入射後の光の進行方向は、入射する角度により異なる。そのため、投影した光は光学系ごとの反射特性・透過特性に従い減衰するため、本来の投影対象となるピクセルに到達する光量もそれによって減衰する。

平面への投影を想定したプロジェクタの使用

一般に利用されるプロジェクタは、水平面に設置し、鉛直に立てられたスクリーンに投影したとき輝度の均一な映像が得られるように補正されている。対して、HHMPD では再帰反射スクリーンの形状は必ずしも最適な条件に一致しない。そのため、プロジェクタ内部でなされる補正は結果的に不適切な影響を及ぼす。

プロジェクタの投影領域の重なり

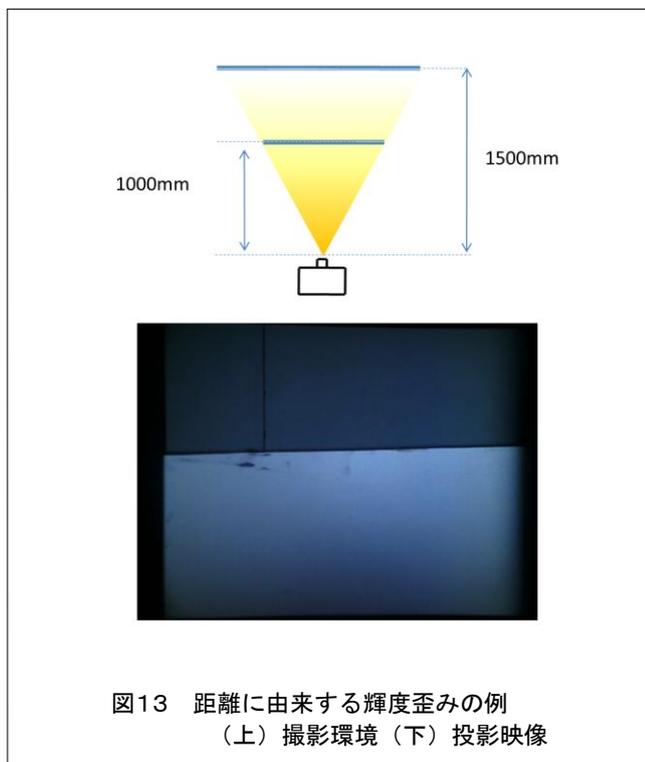
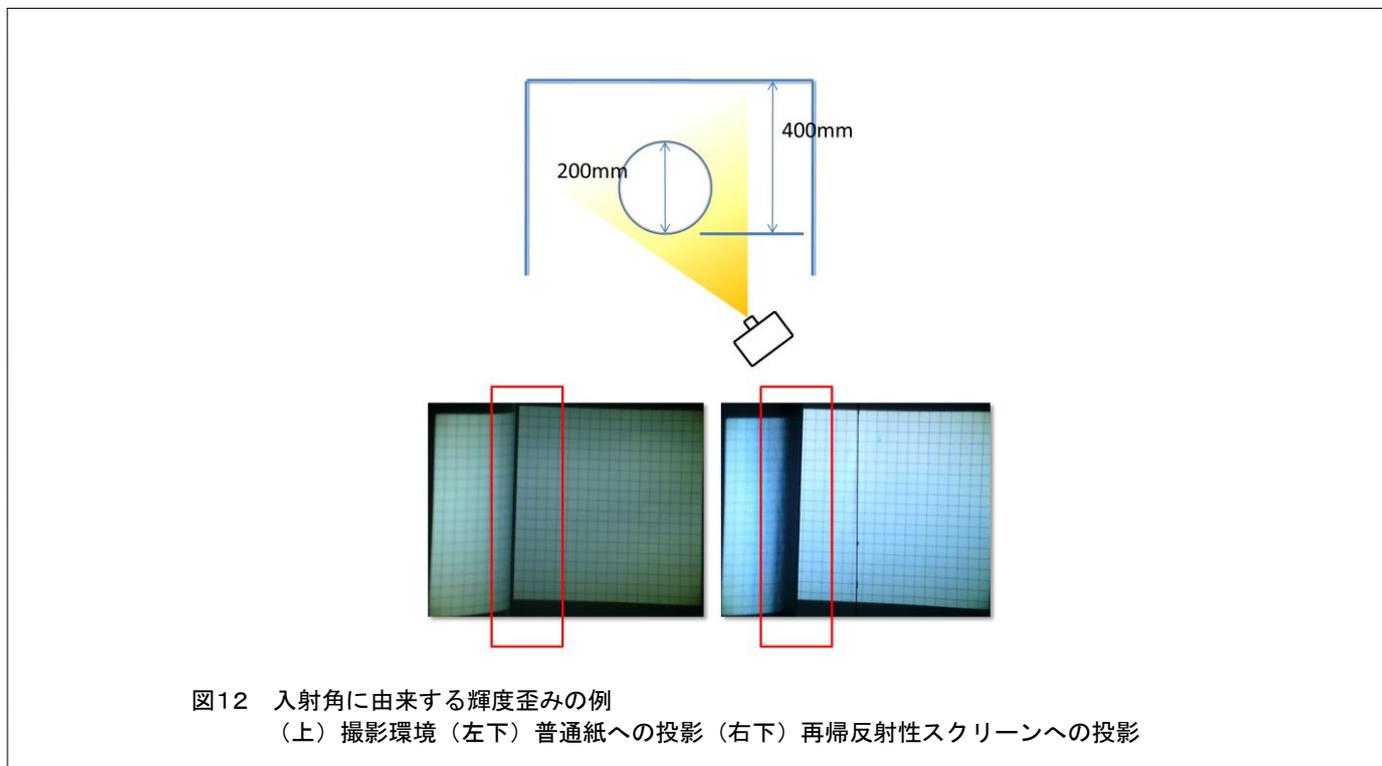
本 HHMPD ではステレオ視を実現するために、2つのプロジェクタを用いている。一方のプロジェクタから発した光が再帰反射スクリーン上で反

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors

射し、他方の光学系の内部焦点に向かってハーフミラーに入射することにより観察画像にクロストークが発生する。

図12、図13は再帰反射材の特性、特に入射角・距離の違いそれぞれに由来する輝度歪みを撮影したものである。本節では、これら再帰反射スクリーン上での



反射特性について取扱い、これを補正する手法について検討する。

6.2.1 輝度補正手法の概要

本項では HHMPD を用いて実装することを前提として導いた輝度補正アルゴリズムについて述べる。本手法では、レンダリング時にピクセルシェードにて、各ピクセルの輝度を適切に調整する。以下にその具体的な手順を示す。

- (1) HHMPD と再帰反射スクリーンの位置関係に応じて、各ピクセルに対する補正係数 w_{xy} を算出する。
- (2) 幾何歪み等のその他のひずみを補正した映像の画素値を得る。
- (3) ピクセルシェード上で、各画素値に w_{xy} を掛け合わせ、得た結果をレンダリングする。
- (4) HHMPD と再帰反射スクリーンの相対位置が変化するたびに、(1)を再度実行する。

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors

6.2.2 反射特性のモデル化

前項で述べた補正係数 w_{xy} をリアルタイムに導出するために、再帰反射スクリーンの反射特性を計測し、その値を元に特性のモデル化を行う。投影距離・入射角に対する、再帰反射スクリーンの示す反射輝度比を明らかにするための計測を行った。実際には、HHMPD 試作機に用いるプロジェクタ MPro110 から投影された光が、同じく試作機にて用いているスコッチライトハイゲイン反射シート 7610 上で反射する光の明度値を計測する。反射光の計測においては、ビームスプリッタを用いてプロジェクタと色彩計 CS-100A を光学共役な位置関係に配置し、再帰反射材の明度 (xyY 表色系における Y 値) を取得する。色彩計と平行に固定したレーザ距離計 Disto Classic 3 により、色彩計と反射材の距離を計測する。また、ビームスプリッタについて MPro110 と対称方向から流入する光の影響を緩和するため、黒不織布を配している。これらの機材の配置を図14に示した。次に、計測の手順を示す。

- (1) プロジェクタより白色の画像を投影する。
- (2) 再帰反射材を距離 L の位置に置く。
- (3) 色彩計を用いて、再帰反射材の明度を 3 回計測する。
- (4) 再帰反射材の角度 θ を 5[度]回転させる。
- (5) 色彩計の計測領域が再帰反射材より狭くなるまで (3)-(4)を繰り返す。
- (6) $L=1,2,3,4,5[m]$ について(2)-(5)を繰り返す。
- (7) 黒不織布からの照り返し値を計測する。

手順(2)-(6)で計測した値の平均値をとり、手順(7)で計測した照り返し値を差し引いて距離・入射角についての反射材の明度を得る。

6.2.3 計測結果

結果を図15に示す。図15のグラフはいずれも 30 度付近にピークがあり、かつ 40-60 度あたりに立ち上がりのある形状となっている。これより、再帰反射材の反射特性を、正規分布の密度関数と分布関数の和で表される関数を式 5 としてモデル化した。本関数は、投影距離 d 、入射角 a を引数として反射輝度比を表す。

$$f(\theta, L) = w_n(L) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(L)} \exp\left(-\frac{(\theta - \mu(L))^2}{2\sigma(L)^2}\right) + w_s(L) \frac{1}{2} (1 + \operatorname{erf}\left(-\frac{\theta - \mu(L)}{\sigma(L)\sqrt{2}}\right)) \quad (5)$$

図15の計測値を最大値で正規化し、本関数にフィッティングした。フィッティングにより係数を割り当てた関数を元に計算した反射特性を図16に示す。本グラフは投影距離 L (1-5[m]) の 5 つの系列について、入射角 θ と計測明度値の関係を示したものである。横軸が入射角 θ [rad]、縦軸が明度である。今回取得した特性グラフは、Winburn らにより計測された入射角についての再帰反射特性とよく似通っていることが分かる(17)。

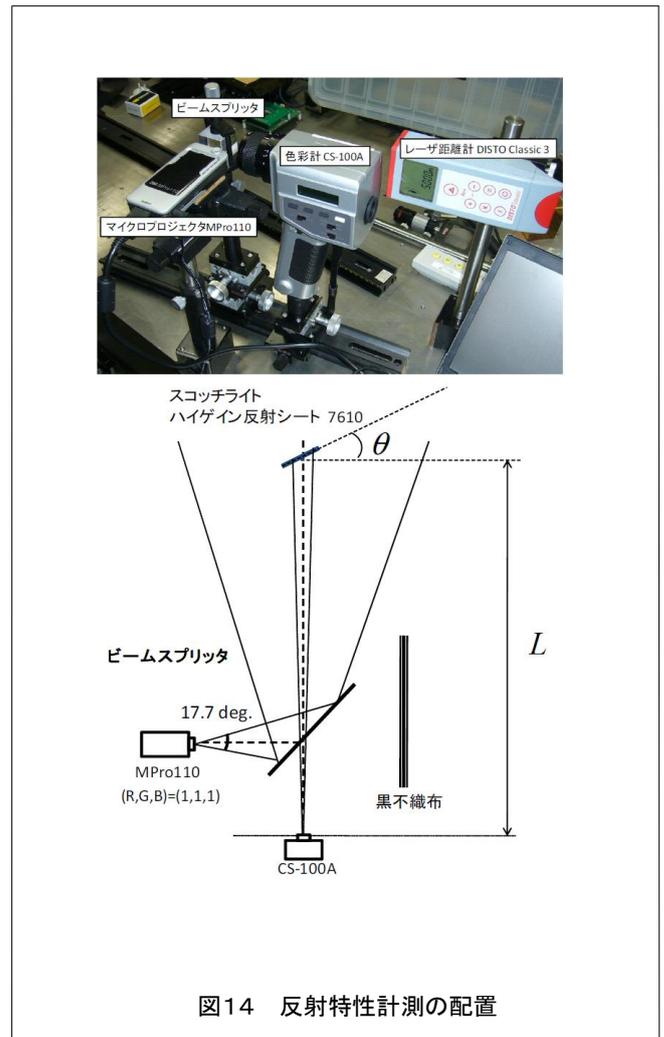


図14 反射特性計測の配置

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究
 A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors

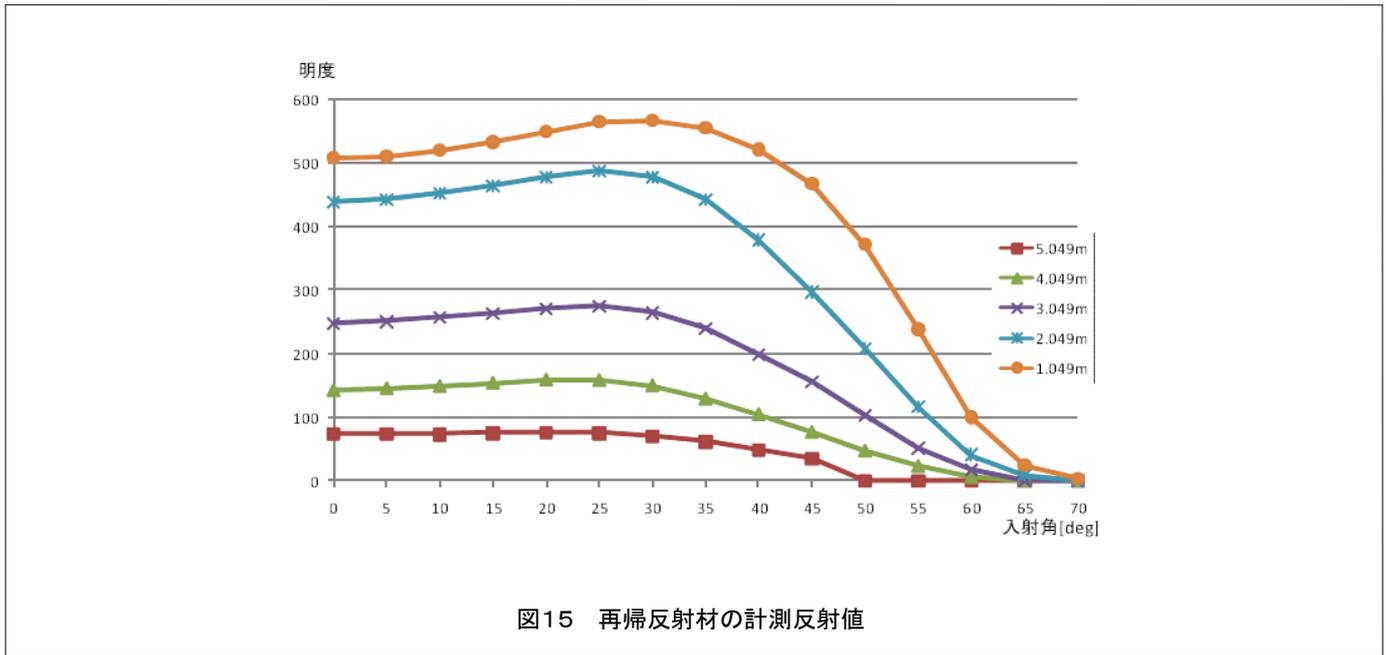


図15 再帰反射材の計測反射値

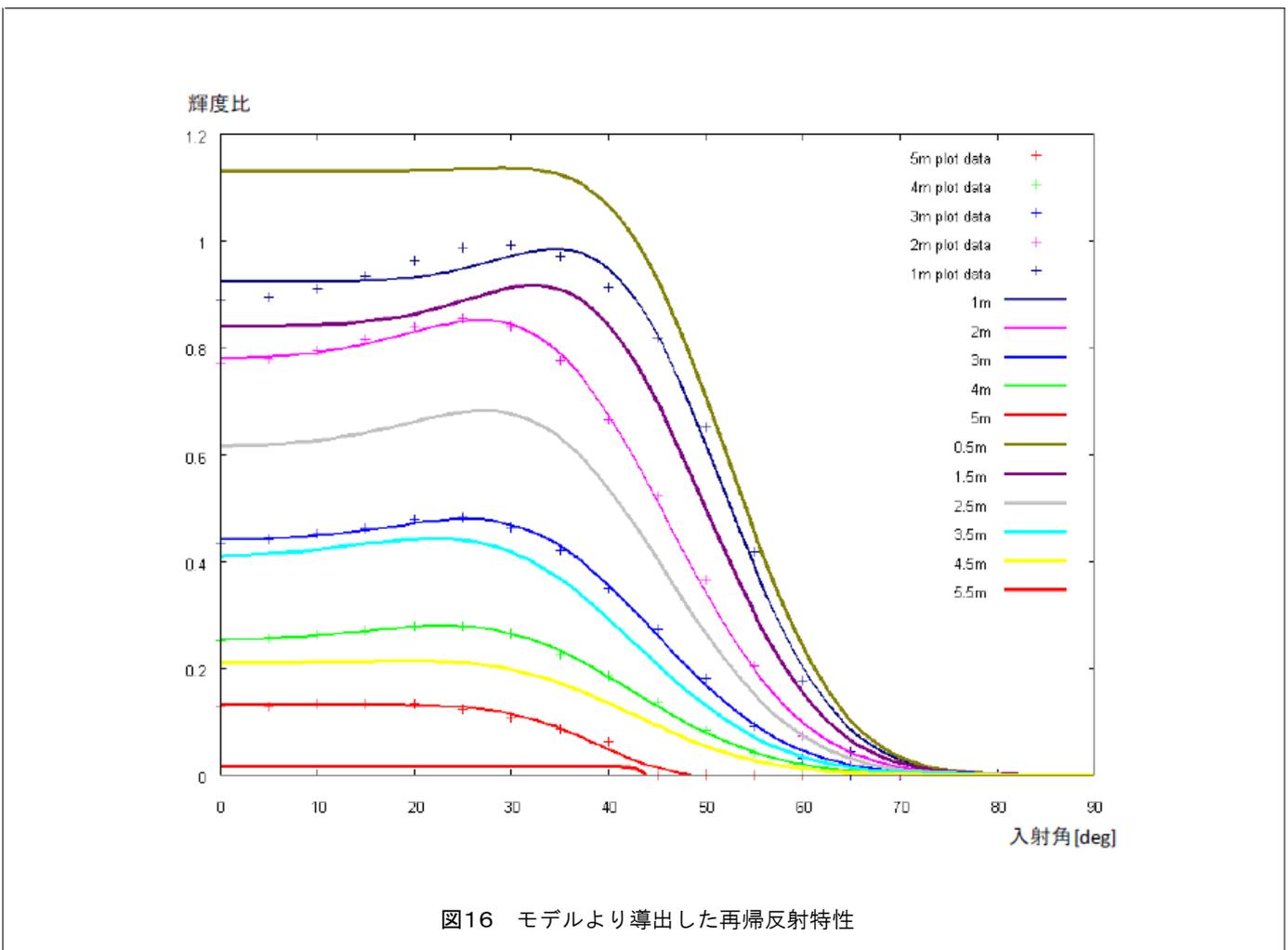


図16 モデルより導出した再帰反射特性

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors

6.3 結果と考察

本関数を元に、提案アルゴリズムによる輝度歪み補正の効果を確かめるために、画像ファイルに対して輝度歪み補正を行うプログラムを作成した。本プログラムは、予め入力した再帰反射スクリーンの配置環境に対して、反射特性による輝度不均一を補正した画像ファイルを出力する。図17に投影環境を、図18に入力画像及び補正画像を示した。この環境にて投影した結果を図19に示す。また、これらの画像の輝度値の分散を表4に示す。これらより、輝度補正手法により輝度値の分散（輝度ムラ）が抑制され、より均質な投影が可能となっていることが確認できる。

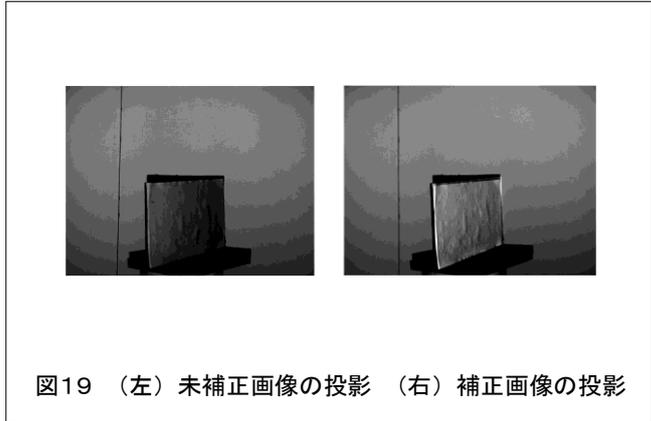


図19 (左) 未補正画像の投影 (右) 補正画像の投影

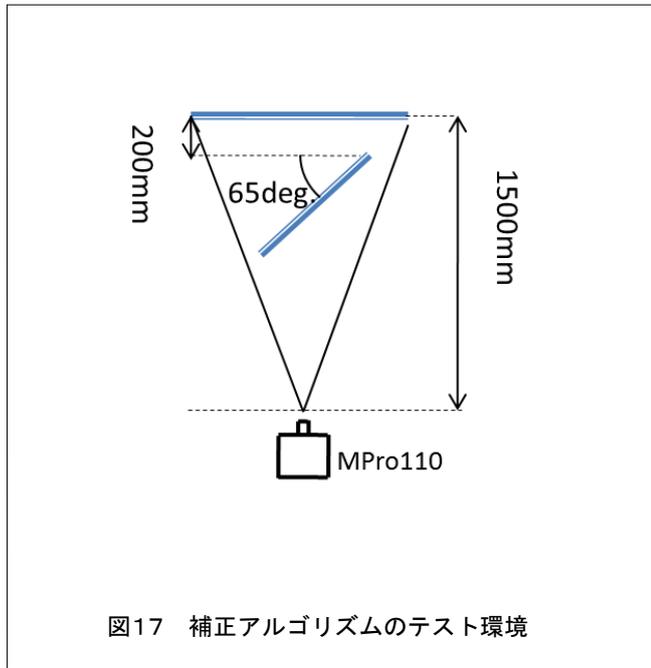


図17 補正アルゴリズムのテスト環境

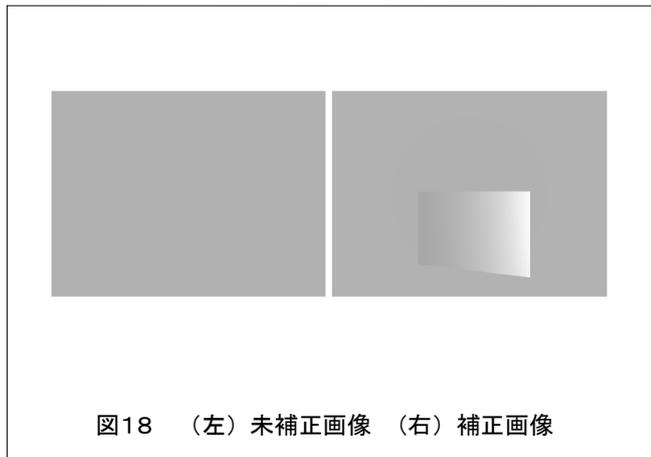


図18 (左) 未補正画像 (右) 補正画像

表4 投影画像の輝度の分散値

入射角	50	55	60	65	70
補正前	469.313	653.806	1183.15	1843.76	617.813
補正後	535.858	512.954	685.459	1017.34	643.339

7. むすび

超広視野の映像を投影可能な新しい頭部搭載型プロジェクタを検討した。提案手法は、平面ハーフミラーではなく、双曲面ハーフミラーを採用することにより、従来の関連手法に比べて広いステレオ視領域や大きな射出瞳などを確保できる利点がある。試作システムを通じて、提案手法の有効性を実際に確認した。また、再帰反射材の反射特性を解析し、静止画像ベースにてレンダリングフェーズでの輝度補正アルゴリズムを検討し、その有効性を確認した。

これらの研究をベースとして、様々な研究を進展させている。例えば、再帰反射スクリーンに光学透過性を持たせた再帰性半透過スクリーンを開発し、これを用いて環境設置の再帰反射スクリーンが不要でウェアラブル環境で利用可能な頭部搭載型プロジェクタを開発している⁽¹⁸⁾。また、プロジェクタ位置にカメラを配置することで、利用者と同様の視点から広視野の映像を撮影する頭部搭載型カメラを試作し、これを用いた視線追跡手法を開発している⁽¹⁹⁾。今後これらの技術をさらに進展させ、広視野映像を利用する様々な映像システムについて研究開発をしていく。

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors

参考文献

- (1) Arthur, K. W., "Effects of Field of View on Performance with Head-mounted Displays," ISBN:0-599-73372-1, University of North Carolina at Chapel Hill Doctoral Thesis, (2000).
- (2) Kiyokawa, K, "An Introduction to Head Mounted Displays for Augmented Reality," in Emerging Technologies of Augmented Reality (Ed. Haller, Thomas and Billinghurst), Ch. III, Idea Group Inc, (2006).
- (3) Howlett, Eric M., "Wide Angle Color Photography Method and System," U.S. Patent No.4406532 September 27, (1983).
- (4) The Sensics piSight, <http://www.sensics.com/>, (2006).
- (5) Sisodia, Ashok, Riser, Andrew, Rogers, John R. "Design of An Advanced Helmet Mounted Display (AHMD)," Proceedings of SPIE, Volume 5801, Cockpit and Future Displays for Defense and Security, Darrel G. Hopper, Eric W. Forsythe, David C. Morton, Charles E. Bradford, Henry J. Girolamo, Ed., pp. 304-315, (2005).
- (6) Nagahara, H., Yagi, Y. and Yachida, M., "Super Wide Field of View Head Mounted Display Using Catadioptrical Optics," MIT Press Presence, 15, 5, pp.588-598, (2006).
- (7) Fisher, "Head-mounted Projection Display System Featuring Beam Splitter and Method of Making Same," U.S. Patent No.5572229, (1996).
- (8) Kijima, Ryugo, Ojika, Takeo, "Transition between Virtual Environment and Workstation Environment with Projective Head-Mounted-Display," Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium 1997, pp.130-137, (1997).
- (9) Hua Hong, Girardot, A., Gao, Chunyu, and Rolland, J. P., "Engineering of Head-mounted Projective Displays," Applied Optics, 39, 22, pp.3814-3824, (2000).
- (10) Kawakami, Naoki, Inami, Masahiko, Sekiguchi, Dairoku, Yanagida, Yasuyuki, Maeda, Taro, and Tachi, Susumu, "Objectoriented Displays: A New Type of Display Systems from Immersive Display to Object-oriented Displays," Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 5, p.493, (1999).
- (11) Inami, Masahiko, Kawakami, Naoki, Sekiguchi, Dairoku, Yanagida, Yasuyuki, Maeda, Taro, and Tachi, Susumu, "Visuohaptic Display using Head-mounted Projector," Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2000, pp.233-240, (2000).
- (12) Hua, Hong, Gao, Chunyu, Biocca, Frank and Rolland, Jannick P., "An Ultra-light and Compact Design and Implementation of Head-Mounted Projective Displays," Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2001, pp.175- 182, (2001).
- (13) Hua, Hong, Gao, Chunyu, Brown, Leonard D., Ahuja, Narendra, Rolland, Jannick P., "A Testbed for Precise Registration, Natural Occlusion and Interaction in an Augmented Environment Using a Head-Mounted Projective Display (HMPD)," Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2002, pp.81-89, (2002).
- (14) Rolland, J., Biocca, F., Hamza-Lup, F., Ha, Y. and Martins, R., "Development of Head-Mounted Projection Displays for Distributed, Collaborative, Augmented Reality Applications," MIT Press Presence, 14, 5, pp.528-549, (2005).
- (15) Yamazawa, K., Yagi, Y. and Yachida, M., "Omnidirectional Imaging With Hyperboloidal Projection," Proceedings of the IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1029-1034, (1993).

双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型ディスプレイに関する研究

A Super Wide-view Head Mounted Display with Hyperboloidal Half-silvered Mirrors

- (16) Kiyokawa, K., "A Wide Field-of-view Head Mounted Projective Display using Hyperbolic Half-silvered Mirrors," *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 2007*, pp.207-210, (2007).
- (17) Winburn, S., Baker, A. and Leishman, J. G., "Angular Response Properties of Retroreflective Screen Materials Used in Wide-field Shadow-graphy," *Exp. Fluids* Vol. 20 (3), pp. 227-229, (1996).
- (18) Duc Nguyen Van, Tomohiro Mashita, Kiyoshi Kiyokawa and Haruo Takemura, "Subjective Image Quality Assessment of a Wide-view Head Mounted Projective Display with a Semi-transparent Retro-reflective Screen," *Proc. the 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2011)*, (2011)
- (19) Mori, M., Sumiya, E., Mashita, T., Kiyokawa, K. and Takemura, T., "A Wide-view Parallax-free Eye-mark Recorder with a Hyperboloidal Half-silvered Mirror and Appearance-based Gaze Estimation," *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, IEEE Computer Society Digital Library*, <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TVC.G.2010.113> , (2010).

この研究は、平成18年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成19年度～21年度に実施されたものです。