双曲面ハーフミラーを用いた超広視野頭部搭載型プロジェクタの設計と実装

Design and Implementation of a Wide Field-of-view Head Mounted Projective Display

竹田 夏木[†], 清川 清^{††}, 正会員 竹村 治雄^{††}

Natsuki Takeda[†], Kiyoshi Kiyokawa^{††} and Haruo Takemura^{††}

Abstract In a virtual reality (VR) environment, a wide field-of-view (FOV) image contributes to improve the immersive experience and situation awareness. The typical FOV of a head mounted display (HMD) is around 20 to 40 degrees, and widening this has been a technological challenge for decades. We designed a new HMD that has a hyperbolic half-silvered mirror. This HMD can resolve the technological challenges and provide a wide FOV, large observational pupil, and optical see-through display. We made a prototype HMD and a VR walkthrough system that displays a pair of stereo images with a FOV of over 120 degrees. This paper reports our HMD's basic concept and the implementation of the prototype.

キーワード：頭部搭載型プロジェクタ, 双曲面ミラー, 広視野, ウォークスルー

1. ま え が き

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1 c)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1 d)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る、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。

本稿では、これら従来手法の問題点の多くを解決する新たなHMDを提案する。2節で基本アイデアを示し、3節で設計の際の検討事項について述べる。4節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節では実際に試作した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。

2. 基本アイデア

本稿では、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)を提案する。一般のHMPD^{7)~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

2008年10月31日受付, 2009年2月16日再受付, 2009年3月10日採録

[†]大阪大学 大学院 情報科学研究科

(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-5, TEL 06-6850-6827)

^{††}大阪大学 サイバーメディアセンター

(〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-32, TEL 06-6850-6828)

[†]Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

(1-5, Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan)

^{††}Cybermedia Center, Osaka University

(1-32, Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-0043, Japan)

図 1 広視野 HMD の従来手法
Typical wide field-of-view optical designs.
a) Refractive, b) Tiling, and c), d) Catadioptric.

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これまで知られていない。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、視線方向に抛らず鮮明な広視野映像を観察できる。

シンプルな構成 HHMPD はプロジェクタを除いて一組の

図 2 提案ディスプレイの概要
Schematic diagram of a Hyperbolic Head Mounted Projective Display (HHMPD).

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

図 3 HHMPD の主要パラメタ
Primary parameters of HHMPD.

のプロジェクト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トの距離 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、 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トの投影画角 NPA は以下の式(4)で与えられる。市販のプロジェクトを利用する場合、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

図 4 HHMPD の主要パラメタの関係
Relationships between the mirror parameter a , ER, PMD, and NPA for a fixed $b = 50$ [mm].

図 5 選択可能なミラーパラメタ a , b の関係
Relationships between the mirror parameter a and b .

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。

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 , およびプロジェクト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 6a 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、

表 1 パラメタ b に対するパラメタ a の選択可能範囲
Necessary ranges of parameter a [mm] when $b = 25, 50, 75$ and 100 [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
b [mm]				
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

図 6 HHMPD シミュレータの画面例
Screenshots of the HHMPD simulator with different mirror parameters and projection angles.

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 6b, 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 6e 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 6f 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. 試作システム

5.1 HHMPD 試作機

図 7 に、提案手法の有効性を確認するために製作した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用い、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。

5.2 レンダリングアルゴリズム

HHMPD 試作機を用いて、実際に広視野で仮想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用い、(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) とすることでもまた処理の高速化を図っている。

5.3 結果・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 節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。

(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。

図 7 試作システムの概観
Bench-top prototype HHMPD.

図 8 魚眼カメラより撮影した左眼観察映像
Projected image captured by a fish-eye camera from the left-eye position.

図 9 観察眼とスクリーンの位置関係
Position relationship between screens and user's eye.

(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 $32 \times 32 \times 2$ 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。

図 10 試作機の水平視野角
Horizontal viewangle of the prototype system.

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

表 2 ポリゴンメッシュのパラメータと処理速度の関係
Relationships between the polygon mesh parameters and processing speed.

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

表 3 ポリゴンメッシュのパラメータと補間精度の関係
Relationships between the polygon mesh parameters and interpolation accuracy.

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

図 11 幾何歪み補正を施した画像（上）
HHMPD を介した撮影映像（下）
Correction image on 512×512 texture
divide by $32 \times 32 \times 2$ polygon. (above)
Projected image. (below)

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. 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提案した。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。今後の課題としてまず、投影画像の輝度の均一化が挙げられる。二つのプロジェクタの投影領域の重なりや、スクリーンの距離といった不均一を生む要因について、その影響を計算機を用いて算出し、投影画像に対して適切な補正を与えることでこれを打ち消すことができると考えられる。その他にも、色にじみや焦点ボケへの対策もまた今後の課題として挙げられる。また、HHMPDの頭部搭載化を実現し、探索タスク等における周辺視の影響に関する影響の調査や、複数人での協調作業環境の実現を行う予定である。

本研究の一部は、文科省科学研究費補助金 特定領域研究「情報爆発」課題番号 19024054, SCAT 研究助成、および立石科学技術振興財団研究助成の支援による。また、VR

図 12 左眼用の投影画像（左上） 右眼用の投影画像（右上）
一定条件下で撮影した左眼映像（中） および 右眼映像（下）
Projection for left eye (left above)
Projection for right eye (right above)
Photo taken from left-eye position (middle)
Photo taken from right-eye position (below)

ウォークスルーシステムの一部は、大阪大学サイバーメディアセンター助教 安福 健祐氏による。

〔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, "Object-oriented 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, "Visuo-haptic 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)
- 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)

たけだ なつき
竹田 夏木 2008 年、大阪大学 基礎工学部情報科学科中退後、同大学院情報科学研究科に入学、現在に至る。拡張現実感に関する研究に従事。

きよかわ きよし
清川 清 1998 年、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年、学振研究員。2001 年、ワシントン大学ヒューマンインタフェーステクノロジー研究所 (HITLab.) 客員研究員。2002 年、大阪大学サイバーメディアセンター助教授。2007 年、同准教授、現在に至る。人工現実感、拡張現実感、CSCW などに関する研究に従事。博士 (工学)。

たけむら はるお
竹村 治雄 1984 年、大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程物理系専攻修了。1987 年、博士後期課程物理系専攻単位取得退学。同年 (株) ATR 入社。1994 年、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。2001 年、大阪大学サイバーメディアセンター教授、現在に至る。ヒューマンインタフェースに関する研究に従事。博士 (工学)。正会員。