

裸眼立体視プロジェクションマッピングの実現に向けた曲面型パララックスバリアの製作方法の検討

村田 有生喜^{*1}

小池 崇文^{*2}

日浦 慎作^{*3}

渡辺 義浩^{*1}

Abstract – 従来のプロジェクションマッピング (PM) では、鏡面反射成分あるいは光の透過を含む質感や、物体を変形する状況の投影において、実世界で発生する両眼視差を呈示できておらず、投影結果が不自然な状態となっていた。そこで我々は、PMにおいて両眼視差を呈示するために、投影対象の形状を模した曲面型パララックスバリアを作成し、投影を行うことで裸眼立体視を可能にするシステムの実現を目指とする。本稿では、3D プリンタで印刷することを想定した曲面型パララックスバリアの設計方法と透明素材による屈折を補償する投影像の作成方法を新たに提案する。さらに、本手法で設計した投影対象を用いて投影シミュレーションを実施し、屈折を考慮することで正しく両眼視差を呈示できることを示した。

Keywords : プロジェクションマッピング, 3D ディスプレイ, パララックスバリア, 両眼視差

1 はじめに

プロジェクションマッピング (PM) は、投影によって実物体の見た目を変容させる技術である。PM で扱われる投影対象は一般に拡散反射物体が想定されており、対象に様々な映像を作成して投影する例が示されている。例えば、Nomoto らは、高速プロジェクタを用いることで、パストレーシング法によってレンダリングされた光沢を持つ素材やガラス素材などを動いている物体に対してリアルタイムに投影する応用例を示した [1]。また、Siegl らは、胸像に対して内部の骸骨を投影するといった、一視点のみで成り立つ変形を伴う投影を実施した [2]。こういった鏡面反射成分あるいは光の透過を伴う質感や、物体の変形を伴う状況では、実世界においては投影対象の表面とは異なる位置に両眼視差が生じる。しかし、PM では投影像が投影対象の表面で拡散反射するために、両眼視差を呈示できておらず、不自然な投影結果となっている。

これに対して、PMにおいて両眼視差を呈示するために、液晶シャッタメガネを用いるシステム [3] や、拡散反射成分のみをプロジェクタで、視点依存成分を OST-HMD で提示するシステム [4] が提案されている。一方、上記のシステムはデバイスの着用が必要であり、裸眼で体験可能という PM の利点が損なわれている。

そこで、我々は、投影対象の形状を模した曲面型パララックスバリアに投影することで両眼視差を呈示する裸眼立体視 PM システムの実現を目指している。パララックスバリアとは、鉛直方向に伸びる細長い遮光部が並んだものである。これをディスプレイの前方

に設置することで、左右の目の位置の違いによって観察できる領域が変化し、視差が呈示できる。

以前の報告では、平面や円筒などの単純な曲面でのみ作られていた従来のパララックスバリアについて、複雑な曲面でクロストークが発生しないように設計する手法を提案した [5]。しかし、同検証で作成した投影対象は、スクリーンと曲面型バリアが持つ厚さを考慮しておらず、CG 上の検証のみを想定した形状だった。

本稿では、曲面型パララックスバリアの製造可能性を考慮した設計方法を提案する。特に、複数種類の素材を同時に印刷可能なマルチマテリアル方式の 3D プリンタを用いることを考え、スクリーンと曲面型バリアを透明素材で覆った形状で製作することを考えた。このとき、スクリーンと曲面型バリア間に存在する透明素材による屈折と投影対象の曲面形状によって投影像に歪みが生じる。そこで、屈折を考慮した曲面型バリアと投影像の作成方法を新たに提案する。さらに、設計した投影対象を用いて投影シミュレーションを行い、提案手法を用いて屈折が発生する状況でも正しく両眼視差を呈示できることを確認した。

2 関連研究

2.1 両眼視差と質感知覚

両眼視差の質感への影響について、視覚心理学の分野で調査が行われている。Wendt らは、両眼視差を呈示することによって、光沢感の真正性 (Authenticity) と強さがいずれも向上することを示した [6]。また、Kimura らは OST-HMD でガラス素材を呈示した場合、両眼視差がある方がリアリティが向上することを明らかにした [7]。これらはステレオスコープや OST-HMD といった PM とは異なる視覚的手がかりが存在

^{*1}東京科学大学

^{*2}法政大学、株式会社 RealImage

^{*3}兵庫県立大学

する場合での調査であった。そこで、我々は予備実験として液晶シャッタメガネを用いた立体視PMシステムを用いて、光沢を持つ素材とガラス素材を投影し、両眼視差の有無で比較を行った。結果から、光沢感、透明感ともに視差を表示したほうが質感を強く感じられることを確認した[5]。このことから、裸眼立体視PMシステムの構築によって、光沢感や透明感といった質感をより自然に表示できる可能性がある。

2.2 両眼視差・視点依存成分を表示するPM

これまでに、両眼視差や視点依存成分を表示するPMシステムが複数提案されている。Okutaniらは、様々な素材の投影対象に対して、液晶シャッタメガネとプロジェクタを同期して投影を行うことで両眼視差を表示し、物体が変形したように見せる試みを行った[3]。さらに、Kimuraらは、液晶シャッタメガネのレンズ部に可変焦点レンズを用いることで、輻輳調節矛盾を解消した立体視PMシステムを提案した[8]。一方、これらはデバイスの着用が必要であり、裸眼で両眼視差を表示することはできない。

また、Hiroiらは、拡散反射成分をプロジェクタで、視点依存成分をOST-HMDで提示するハイブリッドARシステムHySARを提案した[4]。同システムは両眼視差を表示可能であることに加え、高解像度・高ダイナミックレンジで光沢感のある素材を表現可能なシステムとなっている。しかし、同システムはデバイスの着用が必要であり、かつOST-HMDの表示面と投影対象の表面に大きく距離差があることから、顕著な輻輳調節矛盾が生じる。

上記の研究に対し、我々が提案したシステムは、図1に示すように、投影対象の形状を模した曲面型パララックスバリアに投影を行うことで、PMで裸眼立体視を可能にするシステムである[5]。このとき、スクリーン側、すなわち曲面型バリアの裏から投影を行い、観察者は曲面型バリアの表面から投影像を見る。同報告では、仮想平面に曲面型バリアを近似することで、平面型バリアの設計方法を応用した曲面型バリアの設計方法を提案した。さらに、同設計手法によってクロストークが生じない曲面型バリアが設計できることをCGを用いた投影シミュレーションによって確認した。

3 透明素材による屈折を考慮した パララックスバリアの設計

3.1 概要

前節で示した以前の検証[5]で用いたCGモデルは、曲面型バリアやスクリーンが持つ厚さを考慮しておらず、さらに曲面型バリアとスクリーン間には隙間が開いた構造を想定していた。これらの曲面型バリアとスクリーンに0.5mmの厚さをつけてマルチマテリアル

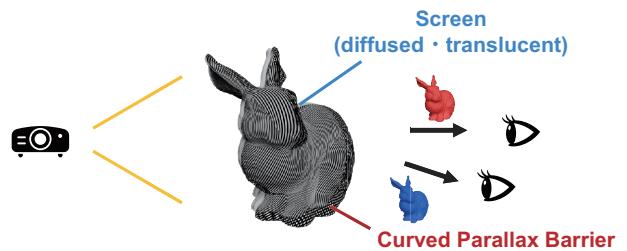


図1 裸眼立体視PMシステムの概要 ([5]より引用)。

Fig. 1 The concept of the autostereoscopic PM system (quoted from [5]).



図2 以前の検証[5]で用いた曲面型バリアの一部を切り取り、上下に接続部を加えた形状を3Dプリントした結果。

Fig. 2 The result of 3D printing of a part of curved parallax barrier which is used in our previous verification [5].

方式の3Dプリンタ(Stratasys Objet260 Connex)で印刷すると、バリアとスクリーンが薄膜であること、バリアのピッチが非常に細かいこと、曲面型バリアとスクリーン内部に形成されるサポート材を取り除くことが困難であることから、図2の左に示すように形状が変形、破損することがわかった。

一方、曲面型バリアとスクリーンを透明素材で覆う形状では、図2の右に示すように、スクリーンの形状やバリアのピッチを保ちながら印刷が可能であることがわかった。なお、このときのスクリーンとは、バリアが作成されている面と反対側の透明素材で形成された面を指す。しかし、曲面型バリアとスクリーンを透明素材で覆う形状では、透明素材の厚さと曲面が持つ曲率により、投影像が屈折して歪むと考えられる。

そこで本節では、投影像が屈折しても正しく両眼視差を表示できるように、以前の報告[5]で提案した設計手法を修正する。従来の設計手法は、図3に示すように、仮想平面を想定して曲面上のバリアを仮想平面に平行投影し、投影された仮想平面上のバリアと曲面型バリアは観察者に見える像が等しいと近似し、平面型バリアの条件式[9, 10]を用いて曲面でもクロストークが発生しないバリアを設計した。用いた平面型バリア[9, 10]の条件式は、いずれもバリアのピッチや開口部の幅とスクリーン上の領域の相似関係からクロス

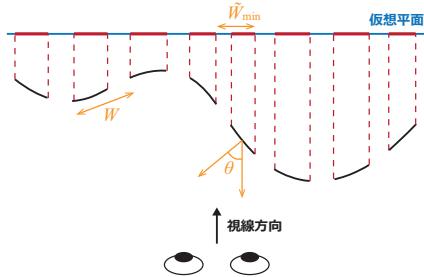


図 3 以前の提案で示した仮想平面による近似 ([5] より引用).

Fig. 3 The virtual-plane-based approximation introduced in our previous work (quoted from [5]).

トーカが発生しない条件を求めていた。本節では、相似関係が屈折によって変化することを利用し、屈折を考慮した条件式に修正する。

さらに、従来の曲面型バリアの設計手法 [5] は、平面型バリアの条件式として Yamamoto ら [9] と Luo ら [10] の設計手法を参考に、パラメータを探索的に求めていた。本節では、2つの先行研究の考えを組み合わせることにより、解析的にパラメータを決定する手法を提案する。

3.2 設計に用いた条件式

まず、屈折が発生する場合の条件式の修正方法について述べる。Yamamoto ら [9] と Luo ら [10] は、観察者、バリア、スクリーンの位置関係から相似関係を用いて条件式を導出している。例えば、Luo ら [10] は、図 4 左に示すように、バリアの開口部の幅に対応する L_{slit} と、各目の位置から見える領域 L_{left} , L_{right} の相似関係を求め、 L_{left} , L_{right} の領域が重ならない状況を考えることで、クロストークが発生しない条件を求めた。このとき、スクリーンとバリア間が屈折の発生する透明素材で埋められている場合、屈折の結果、例えば左目から見える領域は L'_{left} に変化する。右目についても同様に見える領域が変化する。本節では、 L_{left} から L'_{left} への変化が相似比の変化のみで表せるこことを示す。なお、 L_{left} と L_{slit} の相似比は、 L_{view1} , L_{view2} を三角形の相似関係からスクリーン上にマッピングすることで求められることから、以降は図 4 右に示す相似関係について検討する。

屈折が発生する場合の相似関係の変化について考える。観察者からバリアまでの距離を D 、バリアからスクリーンまでの距離を d_b とする。なお、バリアとスクリーンは平面で、観察者が位置する平面と平行に並んでいると仮定し、バリアとスクリーン間は屈折率 n の透明素材で埋まっていると仮定する。このとき、スクリーン上の点 A' から発射した光がバリア上の点 B に角度 θ_1 で入射して屈折し、屈折角 θ_2 で観察者の目に対応する点 C に入射することを考える。スネルの法

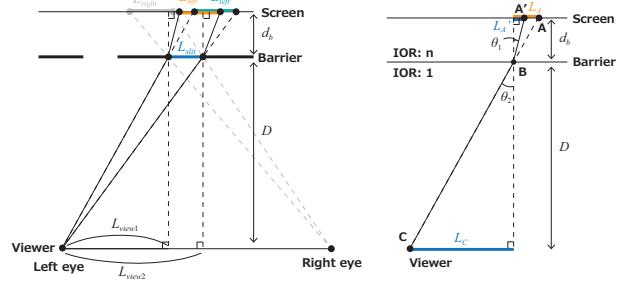


図 4 屈折が発生する場合の相似比の変化。左: 平面型パララックスバリアの条件式を求める際に扱われる相似関係。右: 透明素材による屈折を考慮することによる辺の比の変化。

Fig. 4 The change of similarity ratio. Left: Similarity used to derive the conditions of plane-shaped parallax barrier. Right: The change in ratio of sides by considering the refraction by the transparent material.

則より、入射角を θ_1 、屈折角を θ_2 、透明素材の屈折率を n とすると、以下の式が成り立つ。

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = n \quad (1)$$

θ_1 が十分小さいとき、 $\sin \theta_1 \approx \theta_1$ 、 $\cos \theta_1 \approx 1$ が成り立つ。 θ_2 についても同様である。よって、 $\theta_2 = n\theta_1$ となる。なお、本システムにおいて上記の近似が成り立つののは、物体が持つ水平方向の大きさが観察距離に対して十分小さいときと言える。

近似を用いると、図 4 右に示す辺 L'_A , L_C の比は以下のように計算される。

$$L'_A = d_b \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = d_b \theta_1 \quad (2)$$

$$L_C = D \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} = D \frac{\theta_2}{1} = Dn\theta_1 \quad (3)$$

$$\frac{L'_A}{L_C} = \frac{d_b}{nD} \quad (4)$$

屈折が発生しない場合に点 B を通って観察者の目に見えるスクリーン上の点を A と置くと、図 4 右に示す L_A と L_C の比は相似関係から $L_A/L_C = d_b/D$ である。ここで、 L_A と L_C の比と L'_A と L_C の比を比較すると、屈折が発生する場合、辺の比が屈折率 n の分だけ変化すると捉えられる。以上の事実を用いると、図 4 に示した L_{left} と L'_{left} の差分も辺の比の変化として扱うことができる。よって、観察者とバリア間の距離に屈折率 n を乗算することによって屈折を考慮することができる。

続いて、解析的にバリアのパラメータを求める方法を説明する。まず、以前提案した手法 [5] に基づいて、図 3 に示すように仮想平面を設定する。仮想平面とバ

リアの法線が成す最大の角度を θ , 仮想平面上にマッピングされたバリアのピッチの最小値を \tilde{W}_{\min} , バリアの開口部の幅を \tilde{w}_{\min} とすると, バリアのピッチには一般に下限が存在することから [10], [5] に示す通り曲面上でのバリアのピッチ W は以下の通り表せる.

$$W = \frac{\tilde{W}_{\min}}{\cos \theta} \quad (5)$$

また, 曲面上での開口部 w についても, 仮想平面上でのバリアの開口部の幅の最小値 \tilde{w}_{\min} を $\cos \theta$ で割ることで求まる.

次に, \tilde{W}_{\min} , \tilde{w}_{\min} , d_b が平面型バリアの条件式を満たすように設計を行う. Yamamoto ら [9] は, ディスプレイの水平方向に 1 pixel ずつ交互に右目, 左目に提示する画像を表示することを考え, 特定の視聴範囲内でクロストークが発生しない平面型バリアの設計方法を提案した. さらに, ディスプレイの画素の中心からバリアの開口部の中心を通って結像する位置を基準とすることで(本稿ではこの位置とバリア間の距離を最適視聴距離と呼ぶ), バリアとスクリーン間の距離とバリアのピッチを等式によって求めた. しかし, 我々は観察者や物体が動く場面を想定しており, 任意の視点から両眼視差が成り立つバリアを設計することを目標としているため, Yamamoto らの設計方法をそのまま使用することはできない. 一方, Luo ら [10] は, 観察者が水平方向に移動しても両眼視差を呈示できるように, 各目が見る領域同士の間隔が 1 pixel 以上となるようにバリアを設計した. しかし, 同手法では具体的なパラメータの決定手順が示されていない. そこで, Yamamoto らの式を修正し, 右目と左目に提示する画像が 1 pixel ずつではなく, k ($k \geq 2$) pixel ずつ交互に並ぶと考え, Luo らの条件式と組み合わせることを考える.

入力するパラメータとして, バリアに対する観察者の最適視聴距離を D_{opt} , 最長視聴距離を D_{max} , 最短視聴距離を D_{min} , 両目の間隔を d_e , 透明素材の屈折率を n , スクリーン上での画素ピッチを p , スクリーン上の左右それぞれの目に見える領域のピッチを k ($k \geq 2$) pixel とする. これらを入力することで, バリアとスクリーン間の距離 d_b , 曲面上でのバリアのピッチ W , 曲面上でのバリアの開口部の幅 w が求まる条件式を考える. Yamamoto らの条件式 [9] より, d_b , \tilde{W}_{\min} は以下の通り求まる.

$$d_b = \frac{2kp - \tilde{W}_{\min}}{\tilde{W}_{\min}} n D_{opt} \quad (6)$$

$$\tilde{W}_{\min} = \frac{2d_e kp}{d_e + kp} \quad (7)$$

また, Luo らの条件式 [10] より, D_{min} , D_{max} につい

て以下の条件式が立てられる.

$$\frac{d_e - (\tilde{W}_{\min} - \tilde{w}_{\min})}{(\tilde{W}_{\min} - \tilde{w}_{\min}) - p} d_b < n D_{min} \quad (8)$$

$$n D_{max} < \frac{d_e - \tilde{w}_{\min}}{p + \tilde{w}_{\min}} d_b \quad (9)$$

これを \tilde{w}_{\min} について整理すると, 以下の 2 つの不等式が得られる.

$$\tilde{w}_{\min} < \frac{n D_{min} \tilde{W}_{\min} - p n D_{min} + d_b \tilde{W}_{\min} - d_e d_b}{d_b + n D_{min}} \quad (10)$$

$$\tilde{w}_{\min} < \frac{d_e d_b - n D_{max} p}{d_b + n D_{max}} \quad (11)$$

また, $D_{min} < D_{max}$ より, 以下の式が成り立つ必要がある.

$$\tilde{w}_{\min} < \frac{d_e \tilde{W}_{\min} - 2d_e p + \tilde{W}_{\min} p}{2d_e} \quad (12)$$

式 (10), (11), (12) を満たす最大値を \tilde{w}_{\min} とする. 以上から仮想平面上のバリアのピッチの最小値 \tilde{W}_{\min} , 仮想平面上のバリアの開口部の幅の最小値 \tilde{w}_{\min} , バリアとスクリーン間の距離 d_b が求まり, さらに式 (5) を用いて曲面型バリアのピッチ W , 曲面型バリアの開口部の幅 w が求められる.

3.3 3D プリントを想定したモデリング

取り扱う曲面は, 以前の検証 [5] と同様に, 観察者から見て水平方向に伸びる 2 本の任意の NURBS 曲線によって定義される曲面とした. 2 本の曲線を W と w の長さで交互に区切り, 曲線を区切る点の対応を取って直線で繋いだ. その後, 直線と W の長さで区切られた曲面上の線分で囲まれた領域にバリアを作成することで曲面型バリアを作成した. また, 透明素材は, 作成した直線を滑らかに繋いだ面を作成し, これをバリアが存在する面から法線方向に d_b だけ押し出すことで形状を作成した.

3D プリンタはマルチマテリアル方式の Stratasys Objet260 Connex を用いることを想定している. 透明素材には VeroClear, バリアには黒色の素材である VeroBlack を使用する. しかし, VeroBlack は完全に不透明な素材ではなく, 薄く印刷すると透け, 両目に 2 枚の画像が見えるクロストークの原因となる. そのため, 今回はバリアを厚く印刷することで問題に対処することを考えた. 一方, 単にバリアを法線方向に押し出すことで, 四角柱のような形状のバリアを作成すると, 図 5 の橙色部分のように, バリアの傾きによって側面が見え, 遮蔽される個所が必要以上に大きくなり投影像が暗くなると考えられる. そこで, 本稿ではバリアを三角柱の形状で作成することで, バリアの側面が見えづらく厚さを確保した形状を提案する.

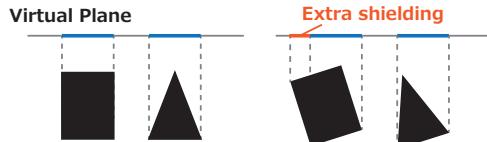


図 5 四角柱形状のバリアと三角柱形状のバリアの比較。

Fig. 5 Comparison of a rectangular-prism-shaped barrier and a triangular-prism-shaped barrier.

4 透明素材による屈折を考慮した 投影シミュレーション

4.1 概要

本研究で提案するシステムは、スクリーンに投影された像を透明素材越しに観察するシステムである。スクリーンに投影された像は屈折により歪むため、歪みを前提とした投影像を作成する必要がある。

本節では、透明素材による屈折を補償するスクリーンへの投影像生成手法を提案する。また、得られた投影像を使用して投影シミュレーションを行い、3節で示した設計手法によって両眼視差を正しく表示できることを確認した。

4.2 屈折を補償する投影像の作成

屈折を補償する投影像を作成するために、図 6 に示すように、左右の目の位置から光線追跡を行い、辿り着くスクリーン上のテクスチャ座標を取得する操作を行う。具体的には、まず、CG 上で左右の目にに対応するカメラを設置する。次に、各カメラの位置から、各画素の中心を通る方向に光線を飛ばす。光線は透明素材に入射した際に屈折しスクリーンに衝突する。この際、衝突したスクリーン上の点のテクスチャ座標を取得する。また、バリアに衝突した際は遮光されたと判定して光線追跡を終了する。以上より、スクリーンのテクスチャ座標と左右の目に見える画像座標の対応関係を取得できる。

別途各カメラからレンダリングした左右の目に見せたい画像を目標画像とし、上記で取得した対応関係からスクリーンのテクスチャ座標に目標画像の画素の色を描画する。得られた 2 枚の画像を足し合わせて作成したテクスチャが表示すべき投影像である。これをスクリーンに適用し、左右のカメラから観察することで投影シミュレーションが実施できる。

4.3 投影シミュレーション

4.2 節に示した屈折シミュレーションを用い、3 節によって設計した曲面型バリアによって正しく左右の目に別々の像が表示可能か検証を行った。投影対象は、以前の検証 [5] で用いたものと同一の形状だった。モデリングには Rhino 8 を用いた。投影対象のパラメータの値は、 $D_{opt} = 600 \text{ mm}$, $D_{max} = 620 \text{ mm}$, $D_{min} = 580$

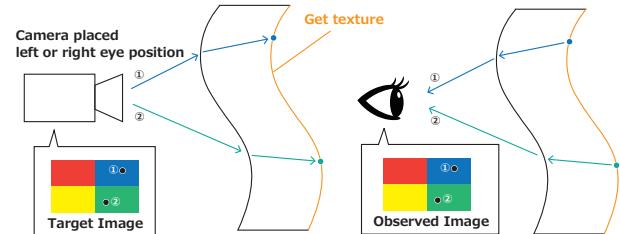


図 6 屈折を考慮した投影像の作成。

Fig. 6 Creation of projection image considering refraction by transparent material.

mm , $d_e = 60 \text{ mm}$, $p = 0.165 \text{ mm}$, $k = 2 \text{ pixel}$, $W \approx 0.924$, $w \approx 0.201 \text{ mm}$, $d_b = 6.6 \text{ mm}$ だった。開口部は、式 (10), (11), (12) を満たすように、各式の右辺から 0.1 mm 引いた値のうちの最小値とした。また、モデリング時に z 軸の正方向を仮想平面の法線とし、曲面上の法線と成す角が最大となるときの値 θ を焼きなまし法で求めた結果、約 44.7 度だった。さらに、VeroClear の屈折率 n は文献 [11] を参考に 1.53 とした。加えて、屈折を考慮しない $n = 1$ で設計した投影対象を用意した。このとき、 $d_b = 3.3 \text{ mm}$ で、その他のパラメータは前述のものと等しかった。バリアは三角柱形状とし、奥行きは 1 mm だった。

パラメータに合わせ、両目に対応するカメラ（解像度 1920×1200 、光線追跡時は 3840×2400 に設定）を CG 上で投影対象の中央から 600 mm 離れた位置に設置した。カメラは水平方向に 60 mm 離れており、いずれも投影対象の中央を向くように姿勢を決定した。なお、両目の高さは注視点と一致していた。シミュレーションは、左目に全面青の画像、右目に全面赤の画像を表示することを目標として、両目に正しい色が見えるか確認した。作成したテクスチャの解像度は 2048×2048 で、カメラの解像度不足によって発生した穴は画像処理で補間した。

シミュレーション結果を図 7 に示す。下段の屈折を考慮していない投影対象では、左目ではクロストーク部分が一切ないものの、右目では全域でクロストークが発生し、赤と青が足された紫の領域が生じている。それに対し、上段の屈折を考慮した投影対象では左目からは青、右目からは赤が見えており、両目ともに一部クロストークが発生している領域があるものの、本手法で設計した投影対象によって正しく左右の目に目標の色を表示できていることがわかる。一方、バリアが傾き、側面が見えることによって、開口部が完全にふさがれ見えなくなる領域が発生することがわかった。

5 考察

4 節のシミュレーション結果から、本稿で提案した屈折を考慮したバリアの設計方法がほぼ正しく機能し

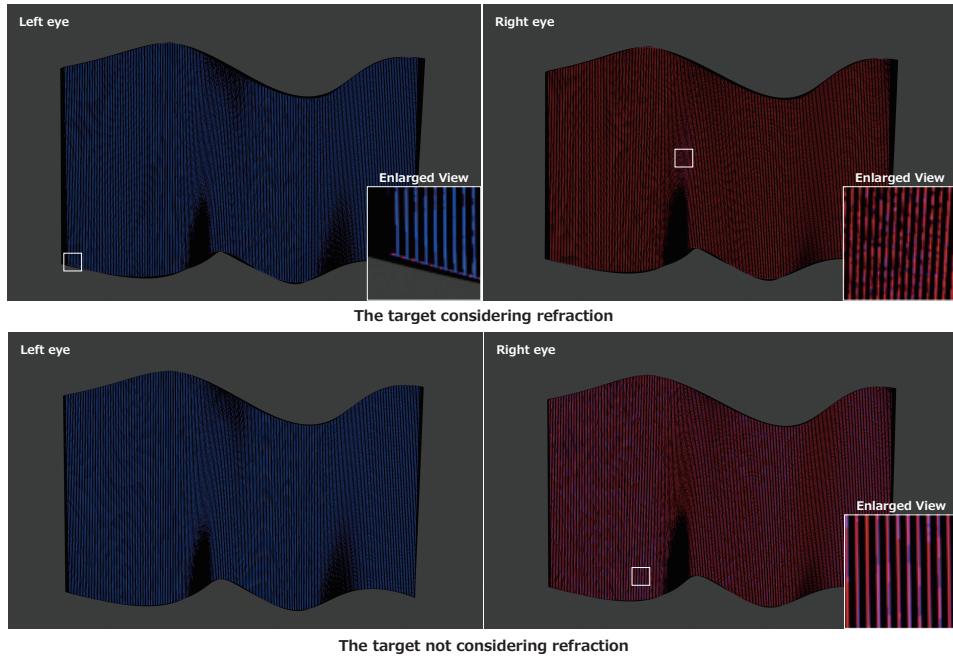


図 7 投影シミュレーションの結果。クロストークが発生している部分を拡大図で示す。

Fig. 7 The result of projection simulation. The area with the crosstalk is showed in the enlarged view.

ていることがわかった。しかし、バリアの側面が見えずかつ透けないように厚さを設けるため、三角柱形状でバリアの奥行きを作成する方法を提案したものの、奥行き 1 mm でも完全に画像が見えなくなるほど遮蔽が生じることが判明した。一方、バリアが多少透けている場合であっても、程度によっては問題なく立体像を呈示できる可能性がある。そこで今後は、バリアの透過と立体像の知覚の関係から、適切なバリアの厚さについてより詳細に考察を行う必要がある。

6まとめ

本稿では、以前の提案をベースに、3D プリンタで印刷できる形状にするためにバリアとスクリーンを透明素材で覆うことを考えた。本構成で正しく両眼視差を呈示できるようにするために、透明素材によって発生する屈折を考慮したバリアの設計方法と、屈折による歪みを補償する投影像の作成方法を新たに提案した。さらに、提案手法によって左右に正しく別々の画像を見せられることを投影シミュレーションによって確認した。今後は、印刷した投影対象を用いて実際に投影実験を行うことを予定している。

参考文献

- [1] Takashi Nomoto, et al. Realistic Dynamic Projection Mapping Using Real-Time Ray Tracing. In *ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies, SIGGRAPH '20*, 2020.
- [2] Christian Siegl, et al. Real-Time Pixel Luminance Optimization for Dynamic Multi-Projection Mapping. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 6, 2015.
- [3] Nagisa Okutani, et al. Stereoscopic Capture in Projection Mapping. *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 65894–65900, 2018.
- [4] Yuichi Hiroi, et al. HySAR: Hybrid Material Rendering by an Optical See-Through Head-Mounted Display with Spatial Augmented Reality Projection. In *2017 IEEE VR*, pp. 211–212, 2017.
- [5] 村田 有生喜, 渡辺 義浩. 裸眼立体視プロジェクションマッピングのための曲面型パララックスバリアの検討. 第 30 回バーチャルリアリティ学会大会, No. 3A1-07, 2025.
- [6] Gunnar Wendt, et al. Highlight disparity contributes to the authenticity and strength of perceived glossiness. *J. Vis.*, Vol. 8, No. 1, p. 14, 2008.
- [7] Yuto Kimura, et al. Representing Virtual Transparent Objects on Optical See-Through Head-Mounted Displays Based on Human Vision. *Appl. Sci.*, Vol. 11, No. 2, p. 495, 2021.
- [8] Sorashi Kimura, et al. Multifocal Stereoscopic Projection Mapping. *IEEE TVCG*, Vol. 27, No. 11, pp. 4256–4266, 2021.
- [9] Hirotugu Yamamoto, et al. Optimum Parameters and Viewing Areas of Stereoscopic Full-Color LED Display Using Parallax Barrier. *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E83-C, No. 10, pp. 1632–1639, 2000.
- [10] Cheng Luo, et al. Crosstalk Reduction for Parallax Barrier Stereoscopic Display Based on High-speed Viewpoint Tracking and Projection. In *IDW*, pp. 451–454, 2020.
- [11] Václav Prajzler, et al. Large core plastic planar optical splitter fabricated by 3D printing technology. *Opt. Commun.*, Vol. 400, pp. 38–42, 2017.