



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

村田有生喜¹⁾, 渡辺義浩¹⁾

1) 東京科学大学 工学院 情報通信系 (〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G2-31, murata.y.26e3@m.isct.ac.jp)

概要: プロジェクションマッピング (PM) では両眼視差が呈示されておらず, 鏡面反射成分を持つ素材や, 投影対象の内部に物体が存在する状況など, 投影対象の表面と異なる奥行き視差を持つ投影像の表現が不十分である. 本稿では, 裸眼立体視 PM システムに向け, まず単純な立体形状を対象として, 同表面に沿う曲面型パララックスバリアの設計方法を報告する. また, シミュレーションにより同システムで両眼立体視が可能か検証した.

キーワード: プロジェクションマッピング, パララックスバリア, 立体・空中像ディスプレイ, 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变化させる試みである. 他の拡張・仮想現実の技術と比べ, デバイスを着用せず仮想の外見を鑑賞することが可能である. 近年は動く物体に投影を行うダイナミックプロジェクションマッピング (DPM) [1] の登場により, 見た目が変化した物体にユーザーが触れ, 動かすようなインタラクティブな体験も実現されている.

Nomoto らは, パストレーシング法でレンダリングしたガラス素材や光沢感を持つ素材を DPM で再現している [2]. また, Siegl らは, マネキンに対して, その内部に骸骨が存在して見せるような投影を行っている [3]. これらの投影では, 素材の鏡面反射成分の影響や, 変形の目標となる形状と投影対象の形状差などによって, 実際には投影対象の表面とは異なる視差を示す状況を再現しようとしている. 視覚心理学の先行研究では, ステレオスコープによる心理実験により, 鏡面反射成分の視差を表現することで光沢感が強く知覚されると報告されている [4]. このことから, PM でも同様に両眼視差を呈示することで, 先述のような状況をより自然に投影できる可能性がある. しかし, 図 1 に示すように, 一般に PM において投影像は投影対象表面で拡散反射するため, 上記の例において両眼視差を表現できていない.

そこで, PM で両眼視差を表現するデバイスとして, 液晶シャッターメガネを用いたシステム [5] や, OST-HMD と PM を組み合わせたシステム [6] が提案されている. しかし, これらのシステムではデバイスの着用が必須であり, 裸眼で観察できる PM の利点が損なわれている.

本稿では, 立体視ディスプレイの手法を用いて投影対象のファブリケーションを工夫することにより, デバイスなしで両眼視差を呈示可能な裸眼立体視 PM システムの構築手法を検討する. 具体的には, パララックスバリアを投影対象の表面に作成し, それに対して投影を行うことで裸眼で

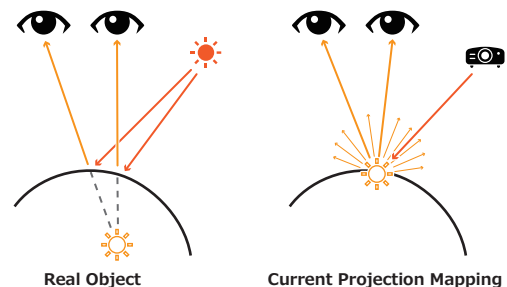


図 1: 鏡面反射成分は角度によって光の反射強度が異なるため, 左図のように視差が生じ, 物体表面とは異なる奥行きにハイライトが位置しているように見える. しかし, PM における投影対象は一般に拡散反射をするため, 右図のように実世界での両眼視差を表現できない. 物体の透過や変形においても同様の問題が発生する.

の立体視を実現する. まず, 本システム実現によって得られる効果を検証するため, 液晶シャッターメガネを用いた立体視 PM システムにより, 両眼視差を呈示することで光沢感や透明感といった質感が強く感じられることを予備実験で確認した. その後, システム実現に向けた基礎検証として, 簡単な立体形状を対象とした曲面型のパララックスバリアの 3D モデルを作成した. さらに, バリアのモデルを用いて投影シミュレーションを行い, 本システムで両眼立体視が可能であることを確認した.

2. 関連研究

PM で視差を表現し, 実物体の見た目をより多様に变化させることに挑戦する研究例がある. Okutani らは, 液晶シャッターメガネとプロジェクタを同期することで両眼視差を表現するシステムを用い, 投影対象を立体的に変形させる投影を行った [5]. しかし, 同システムで検証した投影対象は平面のみとなっており, 複雑な形状を持つ立体物に対する投影は試みられていない. また, 観察者はデバイスを着用する必要がある.

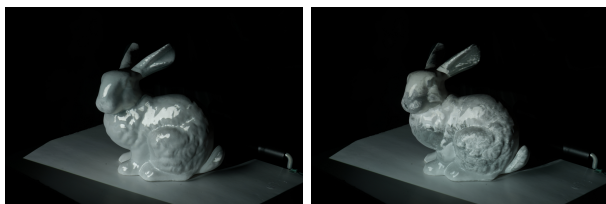


図 2: 液晶シャッターメガネを用いた立体視 PM システムにより、光沢感と透明感を持つ素材をそれぞれ投影した様子。左：光沢感，右：透明感。

また、HySAR [6] は、観察者の視点に依存しない拡散反射成分を PM で、視点に依存する鏡面反射成分を OST-HMD で表示するハイブリッド AR システムである。これにより視点依存成分を複数人のユーザーに対して正しく呈示でき、かつ高解像度・高ダイナミックレンジで素材を表現可能である。しかし、同システムはデバイスの着用が必要である。さらに、OST-HMD で表示する鏡面反射成分は OST-HMD の焦点面で結像するため、投影対象と大きく奥行きがずれが生じ、輻輳調節矛盾が顕著に生じる。

先述の研究例に対し、裸眼で両眼視差を表現し、立体像を知覚させる方法として、パララックスバリア方式の 3D ディスプレイがある [7]。これは、ディスプレイの前に上下方向に細長い遮光部を一定の間隔で並べたバリアを配置することで、場所によって遮光される画像が変化し、両眼視差を表現する技術である。同ディスプレイは一般的に平面で作成されることが多い。一方、Guo らは、曲面スクリーン上にパララックスバリアを作成した [8]。しかし、形状は円筒に限られている。複雑に湾曲したパララックスバリアを用いて立体像を見せることを試みた例は未だ存在しない。

3. PM における両眼視差呈示の効果についての検証

予備実験として、PM の品質における両眼視差の影響について評価するため、液晶シャッターメガネを用いたシステムで効果を検証した。本実験では、両眼視差の呈示により、鏡面反射成分や透過の成分を持つ素材の質感が強く感じられるか評価した。陶器のような素材とガラス素材をパストレーシング法でレンダリングし、それぞれ光沢感と透明感が両眼視差がある場合とない場合のどちらで強く感じられるか筆者 1 名で比較を行った。用いたプロジェクタは Acer X1326AWH (解像度 1200×800 , 120 fps), 液晶シャッターメガネは XGIMI G105L で、DLP Link によって同期を行った。投影対象は Stanford Bunny (幅 約 193 mm × 奥行き 約 149 mm × 高さ 約 191 mm) であり、約 600 mm 離れた位置から観察した。

投影の様子を図 2 に示す。写真は左右の画像が重なって投影されている結果が示されており、液晶シャッターメガネをかけると左右の目それぞれに別々の画像が見える状態となっている。結果から、両眼視差がある場合のほうが光沢感と透明感ともに強く感じられることがわかった。したがって、両眼視差を呈示することは PM での質感表現に有効であると考えられる。

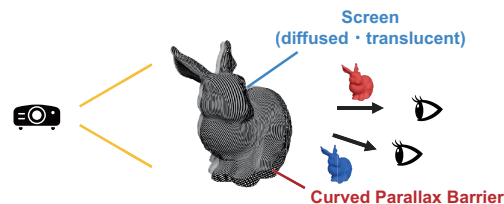


図 3: 裸眼立体視 PM システムのシステム概要図。

4. 曲面型パララックスバリアを用いた裸眼立体視 PM システム

本稿では、パララックスバリアを用い、裸眼で両眼視差を呈示可能な裸眼立体視 PM システムを提案する。具体的には、図 3 に示すように、投影対象としてパララックスバリアと半透明なスクリーンの 2 層構造でつくられた物体を用いる。このとき、投影したい対象の形状に沿うように 2 層を作成する。投影対象のスクリーン側からプロジェクタで適切な画像を投影することにより、バリアによって画像が遮蔽され右目と左目に別々の画像が呈示できる。

本システムは、Luo ら [9] によって検証されたリアルタイムなクロストーク補正と組み合わせることで、DPM へ応用できる可能性がある。その際、投影対象を様々な位置から観察しても等価に効果を得られるよう、バリアは物体表面上において等幅で作成する。DPM と組み合わせることで、投影対象の周囲を見回したり、または投影対象を持って観察したりと、様々な応用の可能性を考えることができる。

5. 曲面型パララックスバリアの作成

曲面型パララックスバリアの作成は、Luo ら [9] および Yamamoto ら [7] の平面型のパララックスバリアの設計方法をもとに行った。バリアに関するパラメータとして、スクリーンに対する観察者の最適視聴距離を D_{opt} 、バリアとスクリーンの間の距離を d_b 、曲面上でのバリアのピッチを W 、バリアの開口率を x 、両目の間隔を d_e 、スクリーン上での画素のピッチを p とする。

曲面の場合、曲面上の微小面と視線の傾きによって、人の目に見えるバリアの幅は変化する。特に、面が視線に対して傾いているほど、バリアは細く観察される。Luo ら [9] による条件式を参照すると、開口率 x と平面型パララックスバリアのピッチ $\tilde{W}$ には以下の関係が成り立つ。

$$\tilde{W} > \frac{2d_e p}{d_e(1-2x) + p} \quad (1)$$

上記の式から、開口率 x が一定の時、バリアのピッチ $\tilde{W}$ には下限が存在する。よって、観察者から見て最も細く見えるバリアが式 (1) を満たすように設計する必要があると考えた。

そこで、本稿では、図 4 に示すように、視線方向と直交する面を考え、この面にバリアを垂直に投影したものが観察者に見えるバリアと仮定する。この面を本稿では仮想平

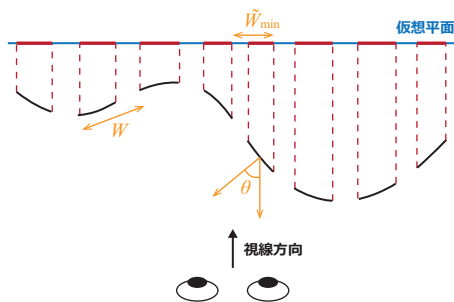


図 4: 仮想平面による曲面の近似。

面と呼ぶ。なお、ここでの視線方向とは、右目と左目の中点からバリアの重心に向かう単位ベクトルとする。このとき、曲面上の微小面の法線と仮想平面の法線が成す角 θ が最も 90 度に近づく点を求める。この点付近に作成されるバリアは、仮想平面上で最も狭いピッチ $\tilde{W}_{\min}$ を持つ。よって、 $\tilde{W}_{\min}$ が式 (1) を満たすように設計することで、クロストークが発生しない曲面型バリアを設計できると考えた。曲面上に作成するバリアのピッチ W は、曲面上の局所面と仮想平面の法線が成す角 θ を用いて以下のように表せる。

$$W = \frac{\tilde{W}_{\min}}{\cos \theta} \quad (2)$$

Luo ら [9] および Yamamoto ら [7] の設計方法を参照すると、バリアとスクリーン間の距離 d_b は以下の範囲に定められる。

$$d_b = \frac{D_{opt} \tilde{W}}{2d_e - \tilde{W}} \quad (3)$$

また、Luo ら [9] の条件式より、観察者の視聴距離 D は以下の範囲に制限される。

$$\frac{d_e - (1-x)\tilde{W}}{(1-x)\tilde{W} - p} d_b < D < \frac{d_e - x\tilde{W}}{p + x\tilde{W}} d_b \quad (4)$$

今回は、仮想平面上でのバリアのピッチ $\tilde{W}$ 、観察者の最適視聴距離 D_{opt} 、両目の間隔 d_e 、スクリーン上でのバリアのピッチ p を事前に与えることで、式 (1) ~ (4) を用い、残りのパラメータを決定した。なお、開口率 x は、今回扱った曲面の視線方向の奥行きが式 (4) を満たすように調整した。

取り扱う曲面は、観察者から見て水平方向に延びる 2 本の任意の NURBS 曲線を引き、その 2 本の曲線を滑らかに繋ぐことによって定義できる曲面とした。このとき、作成した曲面を観察者が見た際に遮蔽が生じないように、曲線は水平方向に折り返さず作成した点に注意する。2 本の曲線を $(1-x)W$ と xW の長さで交互に区切り、曲線を区切る点に対して 2 曲線間で対応を取り、点同士を直線で繋いだ。その後、長さ $(1-x)W$ である曲面上の線分と直線で囲まれた領域に面を作成することで、曲面上等幅なバリアを作成した。また、作成した直線を通る滑らかな面を作成することで、バリアとほぼ同一の曲面を持つスクリーンを作成した。

6. Blender による投影シミュレーション

提案手法で両眼立体視が可能であるか検証するため、5. 章の作成方法に基づいて曲面型のパララックスバリアのモデルを作成し、Blender で投影シミュレーションを実施した。

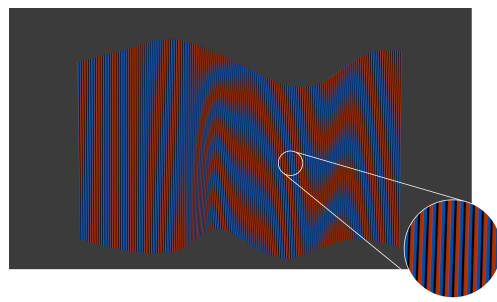


図 5: 左右の目から見た様子をスクリーンのテクスチャとして取得し、2 枚を合成して作成したテクスチャを適用したスクリーンの様子 (バリアを非表示にした場合)。

6.1 シミュレーションの手順

モデリングには CAD ソフトである Rhinoceros を使用した。パラメータの値は $D_{opt} = 600$ mm, $d_e = 65$ mm, $p = 0.1$ mm, $\tilde{W} = 1$ mm, $W \simeq 1.407$ mm, $x = 0.385$, $d_b \simeq 4.651$ mm だった。作成した投影対象は幅 190.0 mm × 奥行き 37.12 mm × 高さ 126.3 mm だった。投影対象を Blender にインポートし、バリアとスクリーンのモデルの原点から $D_{opt} \simeq 600$ mm 離れた場所に右目と左目に対応するカメラを設置した。カメラ同士は水平方向に $d_e = 65$ mm だけ離して設置し、それぞれスクリーンの原点方向を向くように方向を定めた。

今回は、曲面型パララックスバリアによって右目と左目に別々の画像を見せられることを示すため、右目にスクリーン全体が赤の画像、左目に青の画像を呈示することを目標とする。右目に見えるスクリーンの領域を取得するため、スクリーンに赤を描画し、右目に対応するカメラからバリア越しに撮影した。撮影した画像を用いて右目位置からスクリーンに対して投影テクスチャマッピングを行い、投影された画像を UV 座標でマッピングすることでスクリーン表面に描かれるテクスチャを取得した。左目も同様の手順で青のスクリーンを呈示するテクスチャを取得した。上記の手順で得られた 2 枚のテクスチャを足し合わせることで、立体像を見せるために必要なテクスチャを取得した。合成したテクスチャをスクリーンに適用し、左右のカメラから撮影を行い、目標の色が観察できるか確認した。

6.2 結果

合成した UV を適用したスクリーンを、バリアなしで左右の目のちょうど中央から撮影した様子を図 5 に示す。このように、スクリーンの表面には 2 視点の画像が合成して描画されていることがわかる。バリアを表示して左右のカメラから撮影した結果が図 6 である。これを見ると、一部でわずかにクロストークが起きているものの、左右それぞれで目標の色が正しく呈示できている。このことから、曲面型のパララックスバリアを用いた場合でも、観察者に立体像を見せることが可能であることがわかった。

7. 考察

結果から、平面でない曲面型のパララックスバリアを用いた場合でも両目に異なる画像を呈示し、立体像を知覚させられる可能性があることがわかった。また、平面型パララックスバリアの条件を応用し、簡単な曲面を仮想平面を用いて近似してバリアを設計することで、ほぼクロストークが生じないバリアを設計することができた。

一方、部分的にわずかではあるもののクロストークが生じている。これは曲面形状を近似してバリアを設計したことが原因であると考えられる。今回用いた曲面型のバリアは、曲線をもとに作成しているため、実際にはバリアは直線ではなく曲線的に作成されている。しかし、設計の際にはバリアを平面に近似している。さらに、観察者から見えるバリアのピッチを求める際、奥行きの変化による拡張を考慮していない。これらの誤差によってクロストークが生じたと考えられる。よって、曲面形状を近似せずバリアを最適化する必要がある可能性がある。

また、クロストークが発生する領域に投影を行わないことでクロストークを防ぐことも考えられる。クロストークが発生した領域はわずかなため、この領域に投影を行わなくても十分に立体像を見せることが可能と考えられる。

さらに、本シミュレーションではバリアが持つ厚みを考慮していない。実際に 3D プリントする際にはバリアも厚みを持っており、見る方向によってバリアの幅は変化し、スクリーン上で遮蔽される個所も変化する。バリアを完全に最適化するには、この奥行きも計算する必要がある。

加えて、結果から判明した曲面型バリアの問題点として、形状に起因するモアレパターンが発生することがわかった。これは、曲面上等幅のバリアを作成することにより、バリア

の傾きによって特定の視点から見た際のバリアの密度が場所によって変化することが原因である。このモアレパターンは投影結果を観察する際にノイズとなる可能性がある。

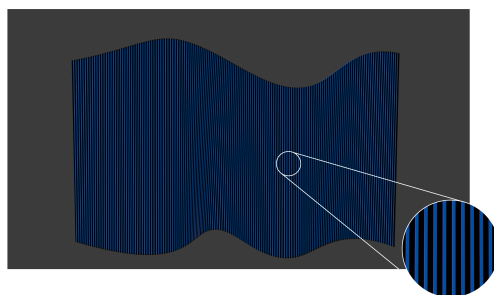
8. まとめ

本稿では、裸眼立体視 PM システムとして、投影対象表面に沿ったバリアを作成して投影する手法を提案した。このシステムの検証のため、観察者から見た場合に遮蔽のない簡単な曲面を想定し、平面パララックスバリアの設計方法に基づいて曲面を近似してバリアを作成する方法を提案した。また、作成したバリアの 3D モデルを用い、Blender で投影シミュレーションを行った。その結果、わずかにクロストークが発生したもの、曲面型のパララックスバリアによって両眼立体視が可能であることが示唆された。

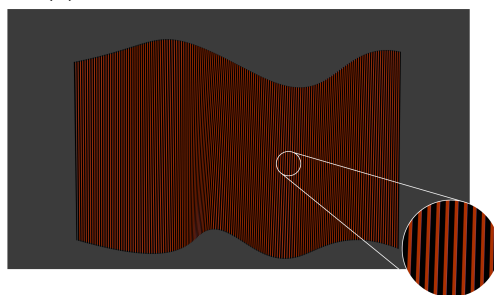
今後の展望として、モアレパターンが最小となるバリアの設計方法を考えることが挙げられる。また、現在は 2 本の曲線のみで定義される簡単な曲面が対象となっているため、より複雑な曲面でのバリアの作成方法を設計する必要がある。さらに、設計した投影対象を 3D プリントをして投影を行い、実機で立体視が可能か検証したい。

参考文献

- [1] 渡辺 義浩. 高速プロジェクタとダイナミックプロジェクトクショニングの進化. 映像情報メディア学会誌, 76(3):322–326, 2022.
- [2] Takashi Nomoto, Ryo Koishihara, and Yoshihiro Watanabe. Realistic dynamic projection mapping using real-time ray tracing. In *ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '20, 2020.
- [3] Christian Siegl et al. Real-time pixel luminance optimization for dynamic multi-projection mapping. *ACM Trans. Graph.*, 34(6), 2015.
- [4] Gunnar Wendt et al. Highlight disparity contributes to the authenticity and strength of perceived glossiness. *Journal of Vision*, 8(1):14, 2008.
- [5] Nagisa Okutani et al. Stereoscopic capture in projection mapping. *IEEE Access*, 6:65894–65900, 2018.
- [6] Yuichi Hiroi et al. HySAR: Hybrid material rendering by an optical see-through head-mounted display with spatial augmented reality projection. In *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, pages 211–212, 2017.
- [7] Hirotsugu Yamamoto et al. Optimum parameters and viewing areas of stereoscopic full-color led display using parallax barrier. *IEICE TRANSACTIONS on Electronics*, E83-C(10):1632–1639, 2000.
- [8] Junda Guo et al. Immersive autostereoscopic display based on curved screen and parallax barrier. *Chinese Optics Letters*, 19(11):013301, 2021.
- [9] Cheng Luo et al. Crosstalk reduction for parallax barrier stereoscopic display based on high-speed viewpoint tracking and projection. *Proceedings of the International Display Workshops*, pages 451–454, 2020.



(a) 左目位置のカメラから撮影した結果.



(b) 右目位置のカメラから撮影した結果.

図 6: バリアを表示し、左右それぞれのカメラ位置から撮影した結果.