



# 前面投影と網膜投影とを重畳呈示する メッシュスクリーン型プロジェクションマッピング

金城和志<sup>1)</sup>, 岩井大輔<sup>1)</sup>, 佐藤宏介<sup>1)</sup>

1) 大阪大学 大学院基礎工学研究科 (〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3)

**概要:** 我々は微細孔板をスクリーンとして網膜投影光を背面から通過させ、それと前面投影によるプロジェクションマッピングとを重畳させた光沢感提示を提案してきたが、より入手性の高いメッシュスクリーンでも同等の光沢感提示が実現できる知見を得た。微細孔スクリーンにおける網膜投影光の輝度モデルと実測輝度との比較を含め、前面投影と網膜投影の透過重畳による高輝度提示に関して報告する。

**キーワード:** 投影型複合現実感, プロジェクションマッピング, 高質感表現ディスプレイ, 網膜投影

## 1. はじめに

プロジェクションマッピングは、実物体に仮想物体の映像を重畳投影することによりその見た目を変化させられる技術で、その性質を利用して様々な分野に応用されている。その一環として、プロジェクションマッピングにより所望の素材質感を表現する研究が行われている。プロジェクションマッピングによる素材質感再現において、光沢感のある素材の鏡面ハイライト表現は課題の一つである。光沢感のある素材質感は、図 1 のように、大部分の低輝度部（拡散反射部）と局所的な高輝度部（鏡面ハイライト部）に分けられる。



図 1: 強い光沢のある素材 (金属表面等)

以前拡散反射部に対する鏡面ハイライト部の輝度比を計測した結果、その比は数倍から十数倍であることが分かった。そのため、鏡面ハイライト表現を想定していないプロジェクションマッピングのデバイスに鏡面ハイライト表現を追加する場合、そのデバイスが表現できる最大輝度を大幅に大きくする必要がある。

高出力のプロジェクタを用いることで表現可能な最大輝度を大きくすることはできるが、高輝度部は局所的であるため、大部分で最大輝度の拡大が無意味となり非効率的である。したがって、小頻度な高輝度部のみを表現するような別デバイスを追加することが望ましい。本研究では、プロジェクションマッピングにおいて鏡面ハイライトのような局所的な高輝度部のみを表現するための光学系を提案する。

## 2. 提案手法

### 2.1 提案手法の原理

本研究では、プロジェクションマッピングにおいて鏡面ハイライトのような局所的な高輝度部のみを表現するため、微細孔板を用いることで前面投影と網膜投影を組み合わせたプロジェクションマッピングシステムを提案する。提案手法の概要図を図 2 に示す。また、実装したシステムを図 3 に示す。

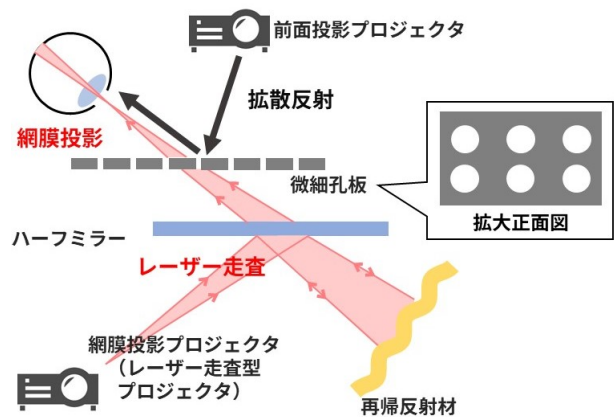


図 2: 提案手法

観察者側からは微細な孔の開いた薄板にプロジェクタで映像を投影し、その拡散反射光を観測する（前面投影）。一方、観察者とは逆側からは、レーザー走査型プロジェクタ、再帰性反射材、ハーフミラーを用いて微細孔板を通過するレーザー光で網膜に直接像を投影する（網膜投影）。レーザー走査プロジェクタから放出された光は図 2 に赤色で示されるような経路で進み、ハーフミラーに関してプロジェクタと面対称な位置で一点に集光され、瞳孔中心を通過して網膜に映像が直接投影される。

液晶ディスプレイの表示画素から直接発せられ拡散していく光やプロジェクタで投影しスクリーンから反射し拡散していく光を目視する場合、瞳孔に入る光は拡散する全光

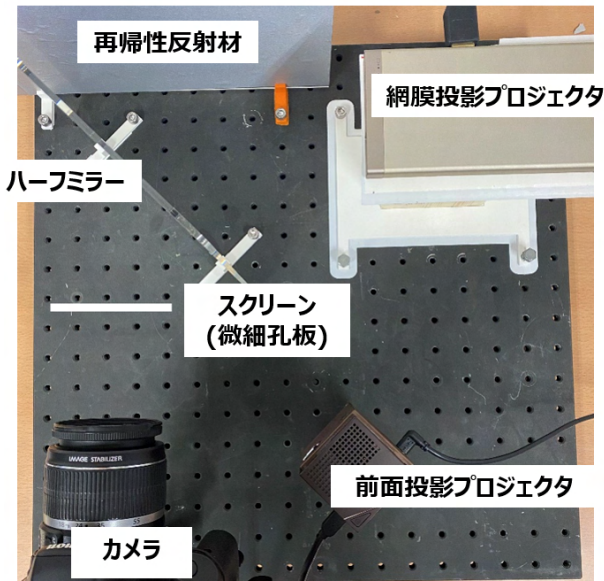


図 3: 実装したシステム

束のごく一部となるが、プロジェクタから出た光を網膜投影するとプロジェクタの光を全て瞳孔へと入れることができる。そのため、網膜投影は発光源から放出された光が網膜に届くまでの伝達効率が非常に高く、高輝度を拡散反射よりも容易に表現することができる。

### 3. 微細孔板

#### 3.1 要件

Takazawa らは、板材に直径 100~200 $\mu\text{m}$  の孔を無数に開け、背面に置いた液晶ディスプレイから拡散する光線を通して薄素材を透かしたディスプレイにするシステムを提案した [2]。この先行研究から、微細孔板の孔の直径を 100~200 $\mu\text{m}$  以下とすることで前面投影の画質を損なうことなく網膜投影光を通過させられると考えられる。また、穴は背面からの光を十分に通過させるのに十分な個数が必要である。さらに、網膜投影光は微細孔板で反射すると瞳孔中心に収束しないため、微細孔板はなるべく薄いものであることが望ましい。

#### 3.2 ドリルで穴開け加工をした薄板

これまで我々は微細孔板としてドリルで微細な穴を開けた薄板を提案していた。以前行った実験では、CNC 加工機を用いて厚さ 0.5mm のポリスチレン製の薄板にドリルで穴を格子状に開け作成した。ただし、直径の小さいドリルは頻りに歯が折れてしまい加工が難しかったため、刃の直径が 0.3mm のドリルを使用した。穴は格子状になるように開け、その間隔は 1mm ずつとした。

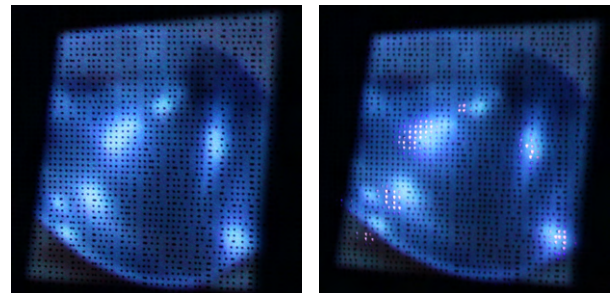
また、作成した微細孔板をスクリーンとして提案手法により前面投影に網膜投影を重畳投影する実験を行った。図 4(a) のような鏡面ハイライトを有する素材の画像を簡易システムで表現した。前面投影では図 4(a) の画像を投影した。ただし、実装したシステムではスクリーンに対して斜めか

ら投影を行っているため、実際には投影結果が正方形となるよう投影画像にアフィン変換を行っている。また、網膜投影では鏡面ハイライト部のみを抽出した図 4(b) のような画像を投影した。結果を図 5 に示す。網膜投影を前面投影に重畳表示することはできているものの、穴が前面投影の画質を低下させている。また、直径の小さいドリルを用いるとバリが発生しやすく、そのバリにより遮蔽され十分な光が通過せず、網膜投影による高輝度化が十分にできなかった。



(a) 表現画像 (前面投影画像) (b) 網膜投影画像

図 4: 投影画像



(a) 前面投影のみ (b) 前面投影+網膜投影

図 5: 前面投影・網膜投影の投影結果

#### 3.3 金属メッシュ板

我々は新たに、微細孔板として細い金属線を格子状に編んだ金属メッシュ板を提案する。今回使用したメッシュ板とその拡大図を図 6 に示す。金属線は円柱形のステンレス線で、線径は 0.06mm、1 インチあたりのメッシュ数は 150 である (以下、1 インチあたりのメッシュ数を m/s という単位で表記)。穴加工では刃径が小さいドリル刃は折損しやすく、エッチング加工の場合は素材が選択される難点がある。一方、メッシュ板は既存の製品であるため、ドリルで穴開け加工したポリスチレン板と比較して調達が容易である。

ポリスチレン板に白色コピー用紙を貼り付けて作成したスクリーンとメッシュ板に画像を前面投影した結果を図 7 に示す。表面無加工のステンレスメッシュ板への投影結果にはむらがあり粒状ノイズが重畳したように視認されるものの、投影画像を認識することは十分可能である。

また、メッシュ板に図 4 の画像を前面投影し、鏡面ハイライト部のみを網膜投影で重畳投影し輝度を高めたものを

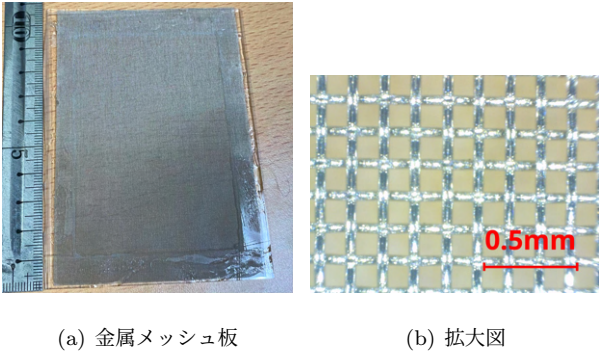


図 6: ステンレスメッシュ板 (白色塗装前)

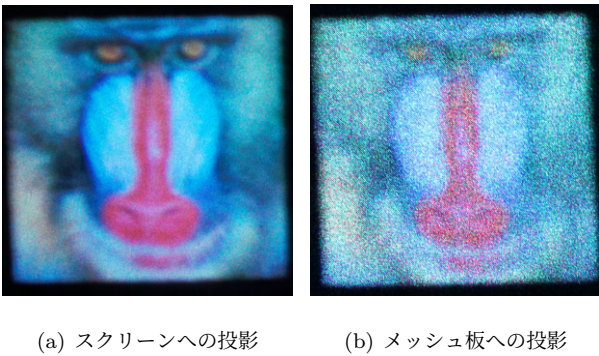


図 7: 前面投影の投影結果

図 8 に示す。なお、メッシュ板での異方性反射を抑えるため、メッシュ板は白色で塗装した。網膜投影を前面投影に重畳できており、穴は視認できない大きさであるため前面投影の画質をほとんど低下させていない。

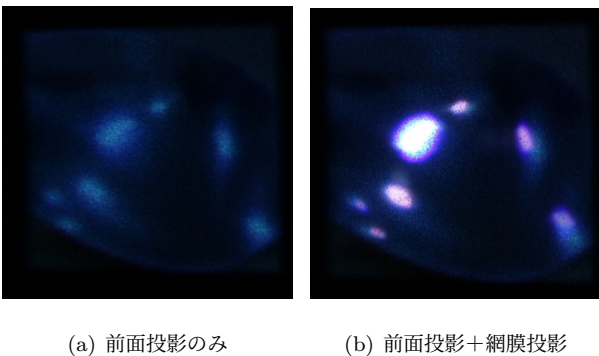


図 8: 前面投影・網膜投影の投影結果

3.4 微細孔板の性質の比較

メッシュ板とドリルで穴開け加工をした薄板の性質を比較する実験を行うため、メッシュ板と穴の大きさや配置が同じとなるような穴をドリルで開けた薄板をポリスチレン板で作成した。メッシュ板については、図 6 に示される線径 0.06mm、150m/s のステンレス製のものを塗装等の表面処理は行わずにそのまま使用した。メッシュ板を厚さ 0.06mm の薄板と仮定すると、メッシュ板の穴は 0.109mm 四方の正

方形であり、この穴と同じ面積の円形の穴をポリスチレン板に開ける場合、その直径は 0.123mm である。しかし、これと同じ大きさの穴をポリスチレン板に無数に開けることは、ドリルの刃が折れてしまうために難しい。そこで、ポリスチレン板のスケールを  $\frac{1}{0.06}$  倍とし、厚さ 1mm のポリスチレン板に直径  $\frac{0.123}{0.06} = 2.05\text{mm}$  の穴を開けたものを作成した (9)。

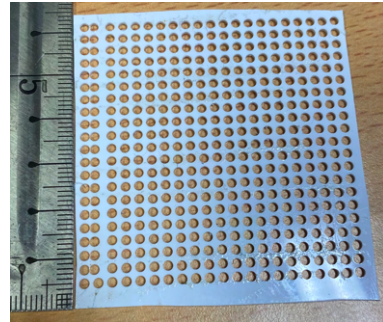


図 9: ドリルで穴開け加工したポリスチレン板 (1mm 厚)

3.5 光の通過特性

ポリスチレン板とメッシュ板の光の通過特性を調べるため、図 10 のような光学系を作成した。ただし、 $\theta = 45^\circ$  の時にモバイルプロジェクタ (レーザー走査型, Sony MP-CL1) と微細孔板は正対し、微細孔板を通過する光量は最大となる。スクリーンと分光放射計 (TOPCON SR-LEDW) の距離は 350mm とした。

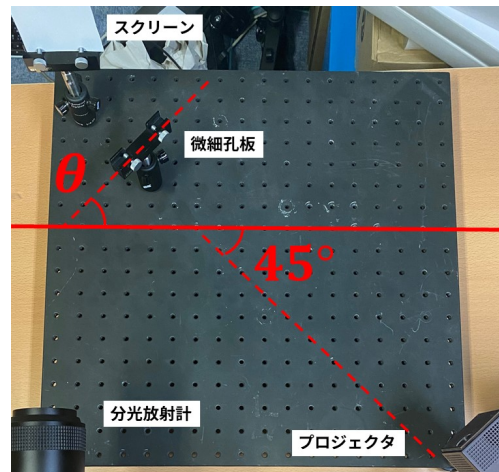


図 10: 微細孔板の通過特性計測に用いた光学系

ドリルで穴加工したポリスチレン板を分光放射計で輝度を計測する。分光放射計では円形の観測窓内の輝度を計測する。しかし、パターンが観測窓に対して十分に細かいとはいえないため、微細孔板との相対位置により計測輝度が変動する。また、メッシュ板についても反射特性が一樣であることは保証されていないため、同様に位置によって計測輝度が変動する可能性がある。

そこで、はじめにポリスチレン板とメッシュ板について、微細孔板の角度は 45° に固定したうえで位置を無作為に動かして 10 回計測を行い、標準誤差を調べた。結果、ポリスチレン板を使用した際の標準誤差は 1.818cd/m<sup>2</sup>、メッシュ板を使用した際の標準誤差は 0.083cd/m<sup>2</sup> となった。また、10 回の計測結果の標本平均と、微細孔板を配置しなかった時に計測された輝度から、微細孔板を通過する光の割合を計算したところ、ポリスチレン板では 39.9%、メッシュ板では 42.2% となった。

次に、微細孔板を 0° から 90° まで 9° ごとに回転させ、それぞれの角度について各 1 回輝度を計測し、輝度の最大値に対する割合を図 11 に示す。ドリルで穴開け加工したポリスチレン板と比較すると、斜めから光が入射した場合であっても光の減衰率が小さいことが示唆された。ただし、メッシュ板は直径 0.06mm の金属線を平織りしたものであり、金属線のうねりから実質的な厚さが増すため、メッシュ板を厚さ 0.06mm の穴が空いた薄板とみなす仮定は適切でない可能性がある。

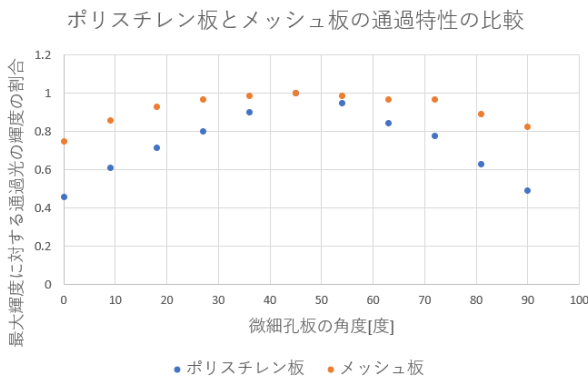


図 11: 微細孔板の通過特性の比較

4. 前面投影と網膜投影の輝度比計測

前面投影と網膜投影の輝度比を計測するため、図 3 の光学系で実験を行った。プロジェクタで白色を投影し、一眼レフカメラで RAW 画像撮影を行い、前面投影プロジェクタから投影した時、網膜投影プロジェクタから投影した時、どちらのプロジェクタからも投影しなかった時の 3 条件で計測を行った。微細孔板には図 6 のメッシュ板を使用した。レーザ走査プロジェクタ内部の光学中心と一眼レフカメラの光学中心がハーフミラーに関して面対称になるようにした。ただし、プロジェクタ内部の光学中心が投射レンズから何 mm 奥まった場所に配置されているかの詳細は不明であるため、網膜投影の輝度を計測する際は、投射レンズから装置内部方向に 20mm の区間を定め区間内で 0mm から 20mm まで 5mm ごとに計測を行った。

画素値が最大値または最小値に近い値であるとノイズの影響を受けやすくなるため、プロジェクタの投影画像の輝度値と画素値が 1 次関数になる範囲を調べ、その範囲はノ

イズの影響を受けない範囲とし、画素値がその範囲になるよう露光条件を変化させた。そして、画素値と露光条件からそれぞれの条件間の輝度比を計算した。

結果を表 1 に示す。2 列目の数値は網膜投影プロジェクタ、前面投影プロジェクタのいずれも消灯した時の環境光による反射輝度を 1 とした時の輝度比である。この輝度比の比較から、網膜投影は前面投影の約 19 倍であることが分かった。鏡面ハイライト部の輝度は拡散反射部の数倍から十数倍であるため、提案手法は鏡面ハイライトを局所的に高輝度化するのに適したシステムであるといえる。

表 1: 環境光による輝度を 1 とした時の輝度比

位置 (投射レンズから装置内部方向)	輝度比
網膜投影 (0mm)	1.5 × 10 <sup>4</sup>
網膜投影 (5mm)	1.8 × 10 <sup>4</sup>
網膜投影 (10mm)	1.9 × 10 <sup>4</sup>
網膜投影 (15mm)	1.9 × 10 <sup>4</sup>
網膜投影 (20mm)	1.9 × 10 <sup>4</sup>
前面投影	1.0 × 10 <sup>3</sup>

5. おわりに

本研究ではステンレス製等のメッシュ板をスクリーンとすることで前面投影に網膜投影を重ね表示するプロジェクションマッピングシステムを提案した。メッシュ板は様々なメッシュ数で調達が容易で、斜め方向から通過する光であっても光の減衰率が小さいことが示唆された。また、実装したシステムにおいて網膜投影の輝度は前面投影の約 19 倍であり、金属表面等の鏡面ハイライトを表現するのに十分であることが分かった。

参考文献

[1] 金城和志, 岩井大輔, 佐藤宏介: 前面投影と網膜投影とを重ね表示する微細孔スクリーン型プロジェクションマッピング. 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集. 2D2-2, 2021.

[2] Kazuki Takazawa et al. Leaked light field from everyday material: Designing material property remained light-field display. In SIGGRAPH ASIA 2016 Posters, SA'16, 2016.