

環境反射型空中像光学系における 反射面に対する空中像の特性の定式化

星 彩水^{1,a)} 小泉 直也^{1,b)}

概要：空中像はエンタテインメントを提供するための技術として挙げられる。光沢素材を反射面として用いると、空中像が飛び出す絵本などを実現できるが、この光沢面の物性と表示される空中像のボケや明るさの関係は定式化されていない。そこで反射面の物性値から、表示される空中像の輝度及びボケを定式化した。その結果、反射面の光沢度から空中像の一部の輝度が求められること、写像性から空中像のボケが求められることがわかった。これによって、どのような光沢素材が空中像提示への適用が可能かを容易に調査できるようになり、例えば屋外環境などでの使用の可否調査などができると考えられる。

1. はじめに

空中像は、ある世界観に入り込むようなエンタテインメント体験を提供するための技術要素になりうる。空中像はあたかも実空間に映像が浮いているように見せる技術であり、AR 技術の 1 つに分類される。ヘッドマウントディスプレイなどの特殊な機器を装着する必要がなく裸眼で観察できることから、複数人での体験にも対応可能である。例えば著者は、ユニバーサル・スタジオ・ジャパンのウィザードディング・ワールド・オブ・ハリー・ポッターの一角で、ペッパーズゴースト方式の空中像を用いて作中に登場する空を飛び降りだす手紙が再現されている様子を見て感激した経験がある。このように、空中像を利用することでアニメーションやコンピュータグラフィックスでしか表現できなかった体験ができる。

本研究では環境に設置された建材などを光学系の一部として用いる環境反射型空中像光学系を扱う。この光学系は、環境背景上に空中像を表示することができ、実世界と空中像の融合が期待できる。我々はこの空中像を用いた飛び出す絵本である PicPop を作成し、イラストを空中に浮かぶ映像で演出する絵本が実現できた [1]。

環境反射型空中像の特性は反射面の素材によって変わるため、実際に表示してこの特性を測定しなければわからない。先に紹介した PicPop の反射面となる光沢紙を選定するとき、あらゆる紙を用意して実際に環境反射型空中像を

表示して確認したため時間がかかった。同じように、ある世界観を作り出すために空中像を用いる際、その空間にあるものを破壊することなく機能を満たす反射面を選択することは、空中像を表示する装置と多数の反射面のサンプルを用意する必要があるため手間がかかる。また、表示させる位置が決定している場合も、空中像の特性を調査するために現場へ装置を持ち込む必要があり手間である。一方で、表面の物性の計測器は小さく、持ち運ぶことができるため、この計測値から空中像の特性が推定することが望ましい。

本論文では、反射面の特性から表示される空中像の特性を得るための式を提案する。測定器で反射面の特性である光沢度、拡散度、ヘーズ、写像性、BRDF を測定し、空中像の特性である輝度とボケとの関係を調査した。一部の観察角度で測定した反射面の光沢度から空中像の輝度が求められた。また、測定した反射面の写像性から空中像のボケが求められた。

今回の提案は、世界観を崩さないよう環境反射型空中像光学系装置を設置するために役立つ。元ある面を反射面として使用可能か容易に調査できるため、世界観が保たれた場所に簡単に空中像を追加することができる。

2. 関連研究

2.1 環境反射型空中像光学系

空中像を表示するために、再帰透過光学素子 (MMAP) を用いる手法がある [2]。MMAP はミラースリットが複数並んだ 2 層のミラーアレイが直交する構造になっており、光源からの光を図 1 のように面对称位置に空中像として結像させる。これを用いたアプリケーションとして、

¹ 電気通信大学
The University of Electro-Communications

^{a)} a.hoshi@media.lab.uec.ac.jp

^{b)} koizumi.naoya@uec.ac.jp

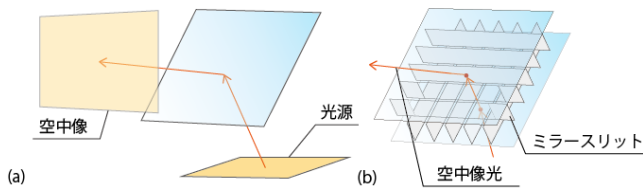


図 1 再帰透過光学素子を用いた空中像表示

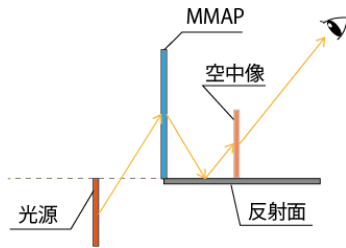


図 2 環境反射型空中像光学系の設計

MARIO[3] や HaptoMime[4], HaptoClone[5] などが挙げられる。

環境反射型空中像光学系の基本的な設計は MMAP を用いて図 2 で表される [6]。光源から出た光が MMAP を透過し、反射面で反射された後に空中像として結像する。そのため、反射面を背景として空中像が表示され、装置と空中像をユーザーの視野内で離して配置することができる。この環境反射型空中像を用いたアプリケーションとして、Decowall[7] や EnchanTable[6], PortOn[8] が挙げられる。

2.2 像の特性

空中像の特性として、輝度、ボケが扱われることが多い。輝度とは観察者が対象を見たときの明るさを表す指標である。Yamamoto ら [6] や Koizumi ら [8] は表示された空中像について輝度で評価している。ボケとは表示の細かさを表す指標である。空中像のボケを評価する指標の 1 つとしてコントラスト伝達関数 (MTF, modulation transfer function) がよく知られている。Osato ら [7] や Koizumi ら [8], Kakinuma ら [9] は表示した空中像について傾斜ナイフエッジ法を用いて MTF 曲線を求め、評価している。また、先行研究 [10][11] では、表示した空中像のボケの評価のためにピーク信号対雑音比 (PSNR, peak signal-to-noise ratio) を使用している。

本研究では環境反射型空中像のボケの評価について PSNR を使用する。PSNR とは、信号が取る最大値とノイズの比率を表す指標である。基準となる画像との信号の差によって求められる差分二乗平均 e^2 を用いて式 (1) で求められる。

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{\text{MAX}}{e^2} \quad (1)$$

ただし、MAX は信号のピークを表す。 e^2 は、 N を画素数、 $x[i]$, $y[i]$ を基準となる画像および比較する画像の i 番目の画素位置におけるグレースケール値として式 (2) で求めら

れる。

$$e^2 = \frac{1}{N} \sum_i (x[i] - y[i])^2 \quad (2)$$

環境反射型空中像は光源からの光を MMAP 内と反射面で反射させる必要があるため、基本的にボケは低くなる。そのため MTF による評価では MTF 曲線が振動するエラーが起きてしまう。このことから、今回は幅広いボケを調査するためにボケが低い像でも差が値として求められる PSNR を用いる。

2.3 反射面の特性

反射面の特性として、光沢度、拡散度、ヘーズ、写像性、双方向反射率分布関数 (BRDF, bidirectional reflectance distribution function) が挙げられる。光沢度は日本工業規格に定められている光の映り込みの明るさを示す指標である [12]。拡散度はキャノンが独自に定めた反射光の広がり具合を示す指標である。ヘーズは国際標準化機構 (ISO, International Organization for Standardization) に定められている光源の映り込み像周辺の拡散を示す指標である [13]。写像性は日本工業規格に定められている表面で反射して見える物体の像がどれほど鮮明に歪みなく見えるかを表す指標である [14]。BRDF は光が入射したときにどの方向にどれだけの光が反射したかを表す反射光強度の角度分布である。

本研究では BRDF を除き、光沢度、拡散度、ヘーズ、写像性の 4 項目を反射面の特性として評価を行う。反射面を評価するために BRDF のデータからシミュレーションすることがよく知られている [15][16]。しかし、反射面を正確に再現するための BRDF のデータを取得するためにはあらゆる向き、反射角度からの測定が必要であり、特殊な機器を使わなければならない。対して、光沢度、拡散度、ヘーズ、写像性を取得できる計測器は多く市販されており、データの取得が容易である。そのため、他の項目を評価のために使用する。

3. 環境反射型空中像の輝度

3.1 仮説

環境反射型空中像光学系における光源からの輝度の減衰について、MMAP での輝度の減衰と反射面での輝度の減衰にわけられる。つまり、環境反射型空中像の輝度は、光源の輝度に対する MMAP で結像された空中像の輝度を MMAP 輝度減衰率、光源の輝度に対する各反射面における反射像の輝度を反射率としたとき式 (3) で求められる。

$$\begin{aligned} (\text{環境反射型空中像の輝度}) &= (\text{光源の輝度}) \\ &\quad \times (\text{MMAP 輝度減衰率}) \\ &\quad \times (\text{反射率}) \end{aligned} \quad (3)$$

反射率について、反射面の光沢度からシュリックの近似式で求め、理論値とすることを考える。シュリックの近似式は光源を無偏光としたときの反射面の反射率を求めるための式であり、式 (4) で表される [17]。

$$\begin{aligned} (\text{反射率}) &= f(\text{屈折率}) \\ &= \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 + \left(1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2\right)(1 - \cos \theta)^5 \quad (4) \end{aligned}$$

ただし、 n は反射面の屈折率、 θ は光が反射面に入射する際の角度を表す。光沢度が式 (5) で求められることから、光沢度から屈折率を求め、各入射角度 θ における反射率理論値を求める。

$$(\text{光沢度}) = \frac{(\text{反射面の反射率})}{(\text{ガラスの反射率})} \times 100 \quad (5)$$

ただし、ここでのガラスは屈折率 1.567 のものを指す。光沢度から反射率理論値を求める際は入射角 60° で測定された光沢度を用いる。これは光沢度において入射角 60° の値を最初に見ることが一般的だからである。光沢度が低く、反射率理論値が負の値になってしまう素材は理論値を用いた分析の際には除去する。

以上から、光源の輝度と MMAP 輝度減衰率が既知だとしたとき、環境反射型空中像の輝度は反射面の光沢度から式 (6) で求められると考えられる。

$$\begin{aligned} &(\text{環境反射型空中像の輝度}) \\ &= (\text{光源の輝度}) \\ &\times (\text{MMAP 輝度減衰率}) \\ &\times \frac{(\text{光沢度}) \times (\text{ガラスの反射率})}{100} \quad (6) \end{aligned}$$

反射率理論値に対する反射率測定値や反射面の特性に対する環境反射型空中像の輝度について回帰分析で求め、評価する。

3.2 実験手順

反射面の特性について幅広く調査するため、73 種の素材を選定した。光沢感のある素材から表面が粗い素材、異方性がある素材など特性の値に幅が出るよう、iPad、フローリング材、壁紙サンプル、紙、アクリル板、ビームスプリッター、金属、大理石などを選定した。フローリング材や金属などは光沢ポリマーを塗布したもの、金属は研磨したものを素材の 1 つとして追加した。

反射面の特性を調査できる表面反射アナライザー RA-532H を用いて各項目について測定した。光沢度について入射角 20° 、 60° 、 85° 、拡散度について入射角 20° 、 60° 、ヘーズについて入射角 20° 、写像性について入射角 60° におけるスリット幅 0.25 mm、0.5 mm、1.0 mm、2.0 mm の項目でそれぞれ測定した。今後光沢度についてそれぞれ光沢度 20° 、光沢度 60° 、光沢度 85° 、写像性についてそれぞ

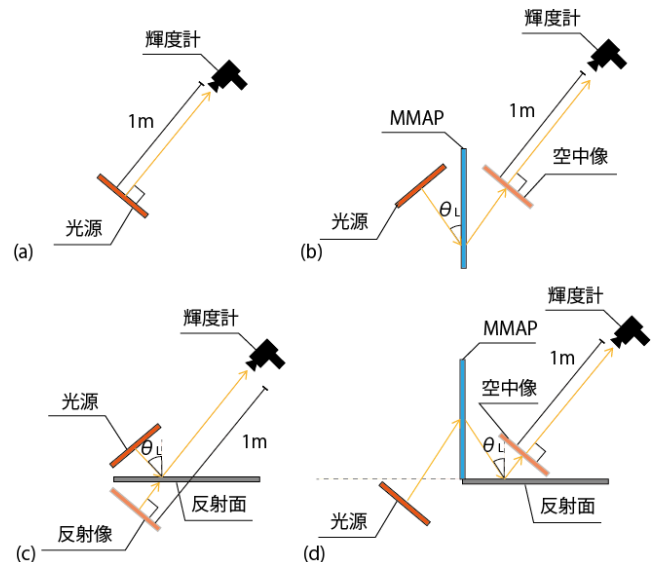


図 3 輝度測定実験 (a) 光源の測定 (b) MMAP で結像された空中像の測定 (c) 各反射面における反射像の測定 (d) 各反射面における環境反射型空中像の測定

れ写像性 0.25 mm、写像性 0.5 mm、写像性 1.0 mm、写像性 2.0 mm と記述する。

光源、MMAP で結像された空中像、各反射面における反射像、各反射面における環境反射型空中像の輝度を測定した。光源として使用したディスプレイにコピー用紙を貼り付けることで無偏光光源とした。これは偏光成分によって反射特性が異なることを考えないためである。MMAP にアスカネット製の ASKA3D プレートを用いた。輝度計としてコニカミノルタ製の CS-150 を用いた。

それぞれの輝度について、図 3 のように測定した。光源は測定する対象が輝度計と向かい合うよう傾けた。各 θ_L の値について 25° – 65° の範囲で 5° 毎に調査した。この範囲は MMAP の視野角であり、実際に空中像が観察できる範囲である。輝度計は測定する対象から 1 m 離れた。環境反射型空中像を表示する際は EnchanTable の設計を参考にした [6]。

3.3 結果

反射率理論値と反射率測定値の関係は図 4 で示されるように式 (7) のように求められた。

$$(\text{反射率測定値}) = a \times (\text{反射率理論値}) \quad (7)$$

a は反射率理論値に対する反射率測定値の割合である。各 θ_L における a の値と決定係数は表 1 のようになった。決定係数について、特に 60° 付近で高くなった。

反射率測定値と環境反射型空中像の輝度の関係は図 5(a) で示されるように式 (8) のように求められた。

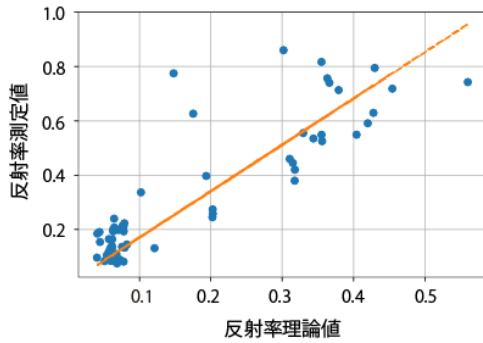


図 4 $\theta_L = 60^\circ$ における反射率理論値と反射率測定値の関係

表 1 反射率理論値に対する反射率測定値の割合

θ_L	a	決定係数
25°	1.703	0.733
30°	1.856	0.530
35°	1.965	0.304
40°	1.978	0.251
45°	1.905	0.418
50°	1.847	0.528
55°	1.744	0.687
60°	1.707	0.735
65°	1.594	0.739

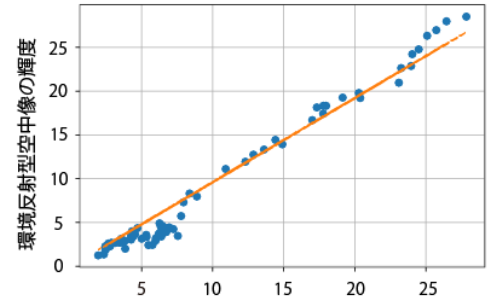
表 2 各 θ_L において反射率測定値、反射率理論値と環境反射型空中像輝度との関係を説明するための α , β の値

θ_L	α	決定係数	β	決定係数
25°	1.146	0.695	1.886	0.333
30°	0.854	0.949	1.618	0.585
35°	0.718	0.877	1.570	0.681
40°	0.645	0.788	1.496	0.738
45°	0.663	0.844	1.416	0.772
50°	0.756	0.864	1.528	0.766
55°	0.957	0.958	1.722	0.780
60°	0.960	0.966	1.667	0.776
65°	1.004	0.949	1.629	0.757

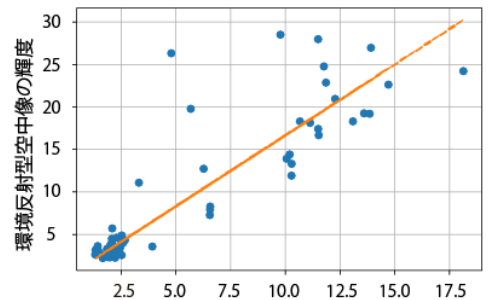
$$\begin{aligned}
 (\text{環境反射型空中像の輝度}) &= (\text{光源の輝度}) \\
 &\quad \times (\text{MMAP 輝度減衰率}) \\
 &\quad \times (\text{反射率測定値}) \\
 &\quad \times \alpha
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

光源の輝度と MMAP 輝度減衰率は実験から求められた値を使用した。補正係数 α と決定係数を表 2 にまとめた。決定係数は全体的に高くなった。

反射率理論値と環境反射型空中像輝度の関係は図 5(b) で示されるように式 (9) のように求められた。



(a) 光源の輝度×MMAP輝度減衰率×反射率測定値



(b) 光源の輝度×MMAP輝度減衰率×反射率理論値

図 5 (a) $\theta_L = 60^\circ$ における反射率測定値と環境反射型空中像輝度の関係 (b) $\theta_L = 60^\circ$ における反射率理論値と環境反射型空中像輝度の関係

$$\begin{aligned}
 (\text{環境反射型空中像の輝度}) &= (\text{光源の輝度}) \\
 &\quad \times (\text{MMAP 輝度減衰率}) \\
 &\quad \times (\text{反射率理論値}) \\
 &\quad \times \beta
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

光源の輝度と MMAP 輝度減衰率は実験から求められた値を使用した。補正係数 β と決定係数を表 2 にまとめた。決定係数は 25° 付近を除き全体的に高くなった。

3.4 考察

反射率理論値と反射率測定値の関係について、 $\theta_L = 60^\circ$, 65° が特に決定係数が高いのは、光沢度 60° のみを使用して反射率理論値を算出したからだと考えられる。このことから、各 θ_L についてそれぞれ光沢度を得ることで、各角度で算出した反射率理論値と反射率測定値の関係が説明できる可能性がある。しかし、光沢度の値が小さいと反射率理論値が負の値をとることから、光沢度から反射率理論値を求めるために用いたシュリックの近似式は今回は適切ではなく、他の式で代用する必要があることが考えられる。

環境反射型空中像輝度は調査した θ_L において反射率測定値と関係があることがわかった。このことは表 2 よりどの θ_L においても決定係数が高いことから説明できる。これにより仮説のように環境反射型空中像光学系における光源からの輝度の減衰が MMAP 輝度減衰率と反射率が

ら説明できることが示唆された。 $\theta_L = 25^\circ$ において決定係数が他より低いのは、MMAP の視野角の端にあたり、MMAP への光の入射角度が大きくなり内での光の反射回数が多くなることによって輝度測定の際に影響したからだと考えられる。

環境反射型空中像輝度は調査した θ_L の小さいときを除き反射率理論値と関係があることがわかった。このことは表 2 より 25° 付近を除いた θ_L について決定係数が大きいことから説明できる。これにより仮説のように環境反射型空中像光学系における光源からの輝度の減衰が MMAP 輝度減衰率と光沢度から説明できることが示唆された。 $\theta_L = 25^\circ$ 付近において決定係数が他より低いのは、先ほどと同様、MMAP への光の入射角度に影響されると考えられる。

以上から、特に $\theta_L = 35^\circ\text{--}65^\circ$ の範囲において、環境反射型空中像輝度は光沢度を用いた式 (10) で求められることがわかった。

$$\begin{aligned} & (\text{環境反射型空中像の輝度}) \\ &= (\text{光源の輝度}) \\ &\times (\text{MMAP 輝度減衰率}) \\ &\times \frac{(\text{光沢度}) \times (\text{ガラスの反射率})}{100} \\ &\times \beta \end{aligned} \quad (10)$$

これは表 2 の決定係数に裏付けされており、 $\theta_L = 60^\circ$ 付近での決定係数が高いことから説明できる。

4. 環境反射型空中像の PSNR

4.1 仮説

環境反射型空中像光学系における光源からの PSNR の低下について、MMAP での PSNR の低下と反射面での PSNR の低下にわけられる。つまり、環境反射型空中像の PSNR は MMAP で表示した空中像の PSNR を MMAP 空中像 PSNR、反射面に映した反射像の PSNR を反射像 PSNR としたとき式 (11) で求められと考えた。

$$\begin{aligned} & (\text{環境反射型空中像の PSNR}) = (\text{MMAP 空中像 PSNR}) \\ &\quad \times (\text{反射像 PSNR}) \\ &\quad \times (\text{補正係数}) \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、他の要因でも PSNR の低下があると考え、単純な積ではなく補正係数を入れることとした。

反射面での PSNR の低下について、反射面の写像性から求めることを考える。写像性は反射面に映った像がどれほど鮮明であるかを求める指標であるため、像のボケが低下することによる PSNR の値の変化と関係があると考えられるからである。

以上から、基準と MMAP 空中像 PSNR が既知だとした

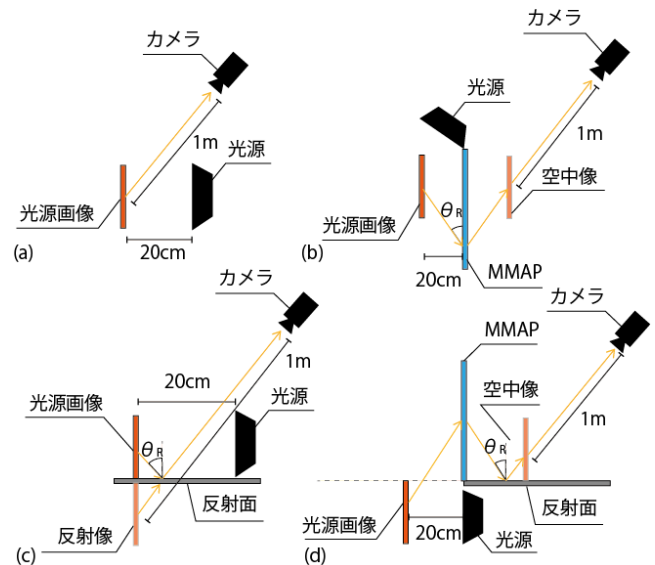


図 6 PSNR 測定のための撮影 (a) 光源の撮影 (b) MMAP で結像された空中像の撮影 (c) 各反射面における反射像の撮影 (d) 各反射面における環境反射型空中像の撮影

とき、環境反射型空中像の PSNR は反射面の写像性から算出した反射像 PSNR を用いて式 (11) で求められると考えた。反射面の特性に対する環境反射型空中像の PSNR や反射像 PSNR に対する環境反射型空中像の PSNR について回帰分析で求め、評価する。

4.2 実験手順

反射面についてはセクション 3 と同様のものを使用した。

4.2.1 データ取得のための撮影

光源画像を 2 パターン用意し、光源画像、MMAP で結像された空中像、各反射面における反射像、各反射面における環境反射型空中像をそれぞれ撮影した。光源画像としてマットフォトペーパー MP101 で作成した白画像、マットフォトペーパー MP101 と遮光・吸光シート、スーパーブラック IR で作成した白黒画像を用いた。光源画像に光を当てるためのライトとして YONGNUO 製の YN900 を用いた。MMAP にアスカネット製の ASKA3D プレートを用いた。カメラには SONY 製の ILCE-7M3 を用い、F 値 5.6、ISO 感度 50、シャッタースピードは各撮影において白飛びをしない限界値に設定した。また撮影時は振動でぶれないよう 2 秒タイマーを使用し、RAW 画像として保存した。

それぞれの PSNR を測定するために図 6 のように配置し撮影した。 θ_R は反射面を鏡としたときの空中像の輝度が最も高くなる角度である 40° とした。カメラは測定する対象から 1 m 離れた。環境反射型空中像を表示する際は EnchanTable の設計を採用した [6]。

4.2.2 撮影画像から PSNR の算出

撮影した RAW 画像を TIFF 画像に変換した。Python のモジュールの 1 つである rawpy の postprocess 関数を利

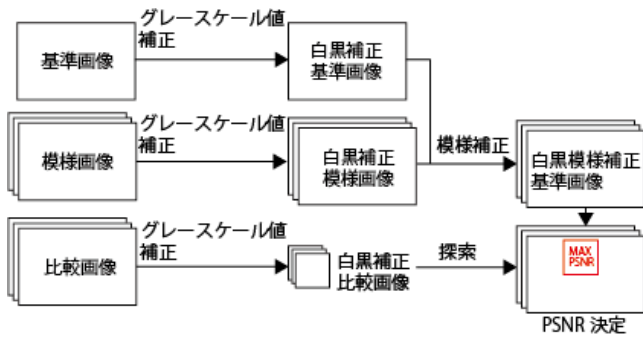


図 7 PSNR を算出するためのフロー

用した。このときガンマ補正をかけずに 16 bit/ch で保存した。

正しく PSNR を算出するため、3 種類の画像を用い、図 7 に従って処理した。1 つ目は光源画像を白黒画像として直接撮影した基準画像である。2 つ目は各反射面について光源画像を白画像として撮影した模様画像である。3 つ目は各反射面について光源画像を白黒画像として撮影した比較画像である。基準画像と比較画像だけでは、実験者が見たときは同程度のボケに見えるにも関わらず、反射面の模様に影響を受け、大きく異なる PSNR が算出されることがあったため、模様画像を利用することで補正した。また、画像の明暗の違いによっても間違った PSNR が算出されてしまうため、補正を行った。グレースケール画像としてそれぞれ読み込んだ。

基準画像のグレースケール値の補正を行い、図 8(a) のように白黒補正基準画像とした。基準画像について元の TIFF 画像では全体的にグレースケール値が高く暗かったため、白部分と黒部分の境界（白黒境界）を見せる目的で補正した。まず、画像内のグレースケール値の最小値 min と最大値 max を取った。次に、最小値が 0 に、最大値が 2^{16} になるよう全体を補正した。補正前の画像の i 番目の画素位置におけるグレースケール値を $k[i]$ とし、補正後の画像の i 番目の画素位置におけるグレースケール値を $k'[i]$ とし、式 (12) を使用して処理した。

$$k'[i] = (k[i] - min) \frac{2^{16}}{max - min} \quad (12)$$

比較画像を切り取り、グレースケール値の補正を行い、図 8(b) のように白黒補正比較画像とした。PSNR は画像間のグレースケール値の差が顕著に現れるため、2 種類の比較画像について、ボケが同程度であっても明るさが異なると PSNR の値に差が出てしまう。そこで反射面の明暗に関わらずボケのみで評価できるように補正した。グレースケール値の補正は比較画像の白黒境界を 100 pixel × 100 pixel で切り取り、その部分について式 (12) を用いて先述と同様に行った。切り取る大きさは、反射面が小さい場合でも対応でき、ボケが小さい場合でも差が出る大きさとして 100 pixel × 100 pixel に決定した。

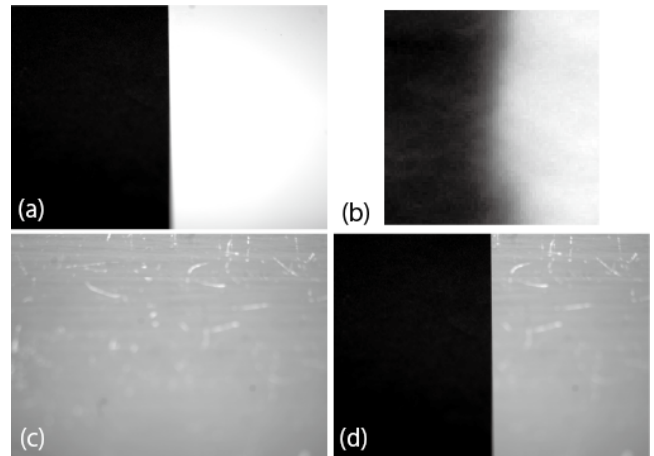


図 8 補正画像 (a) 白黒補正基準画像 (b) 白黒補正比較画像 (c) 白黒補正模様画像 (d) 白黒模様補正基準画像

白黒補正基準画像に模様画像のグレースケール値の補正を比較画像の補正時の値を基準に行った白黒補正模様画像を合成し、図 8(d) のように白黒模様補正基準画像とした。2 種類の比較画像について、ボケが同程度であっても反射面の模様が異なると PSNR の値に差が出てしまう。そこで反射面の模様に関わらずボケのみで評価できるようにするため、白黒補正基準画像に模様画像を重ね、模様の有無による結果の差を無くした。まず、比較画像のグレースケール値を補正した際に使用した最大値と最小値を用いて模様画像のグレースケール値の補正を行い、図 8(c) のように白黒補正模様画像とした。次に、白黒補正基準画像と白黒補正模様画像を合成した。白黒補正模様画像の i 番目の画素位置におけるグレースケール値を $l[i]$ 、基準画像の i 番目の画素位置におけるグレースケール値を $s[i]$ 、補正後の画像の i 番目の画素位置におけるグレースケール値を $s'[i]$ とし、式 (13) を使用して処理した。

$$s'[i] = \begin{cases} s[i] & (l[i] \geq s[i]) \\ l[i] & (l[i] < s[i]) \end{cases} \quad (13)$$

白黒模様補正基準画像内で、白黒補正比較画像の PSNR が最も高くなる位置での値を記録し、その反射面の PSNR とした。これは白黒模様補正基準画像の白黒境界と、白黒補正比較画像の白黒境界を一致させ正しく PSNR を算出するための操作である。まず、白黒模様補正基準画像を任意の位置において探索窓として 100 pixel × 100 pixel で切り取り、その部分と白黒補正比較画像から PSNR を算出した。このとき OpenCV の PSNR 関数を用いた。次に、探索窓を移動させながら PSNR を記録し、最も高い値をその反射面の PSNR とした。ただし、最も高い PSNR を出した探索窓の位置が白黒模様補正基準画像の白黒境界から外れていた場合は、指定した白黒境界との PSNR 値をその反射面の PSNR とした。これは白黒補正比較画像の白黒境界があいまいになることで起こるため、疑似的に白黒境界を決定し PSNR を求めた。MMAP で結像された空中像、各反射面

における反射像, 各反射面における環境反射型空中像を撮影して算出した PSNR をそれぞれ MMAP 空中像 PSNR, 反射像 PSNR 測定値, 環境反射型空中像 PSNR とする。

4.3 結果

反射面の特性の 1 つである写像性と反射像 PSNR 測定値の関係は式 (14) のように求められた。

$$\begin{aligned} (\text{反射像 PSNR 測定値}) = & 0.515 \times (\text{写像性 } 0.5 \text{ mm}) \\ & - 0.664 \times (\text{写像性 } 1.0 \text{ mm}) \\ & + 0.304 \times (\text{写像性 } 2.0 \text{ mm}) \\ & + 11.187 \end{aligned} \quad (14)$$

決定係数は 0.702 であり, 各項目について 0.1%水準で有意であった。反射面 PSNR 測定値を目的変数とし, 写像性 0.25 mm, 写像性 0.5 mm, 写像性 1.0 mm, 写像性 2.0 mm をそれぞれ独立変数として回帰分析した際は写像性 0.25 のみ有意差がなかった。式 (14) から求められる反射像 PSNR を反射像 PSNR 理論値とする。

反射像 PSNR 測定値と環境反射型空中像 PSNR の関係は図 9(a) で表され, 式 (15) のように求められた。

$$\begin{aligned} (\text{環境反射型空中像の PSNR}) = & (\text{MMAP 空中像 PSNR}) \\ & \times (\text{反射像 PSNR 測定値}) \\ & \times 0.0125 \\ & + 10.655 \end{aligned} \quad (15)$$

決定係数は 0.604 であった。

写像性から求められる反射像 PSNR 理論値と環境反射型空中像 PSNR の関係は図 9(b) で表され, 式 (16) のように求められた。

$$\begin{aligned} (\text{環境反射型空中像の PSNR}) = & (\text{MMAP 空中像 PSNR}) \\ & \times (\text{反射像 PSNR 理論値}) \\ & \times 0.0147 \\ & + 9.733 \end{aligned} \quad (16)$$

決定係数は 0.592 であった。

4.4 考察

写像性と反射像 PSNR 測定値の関係について, 写像性 0.25 mm との関係が薄いのは, 写像性 0.25 mm の値に差がでなかったことが原因だと考えられる。写像性 0.25 mm はボケが高い反射像を表示する反射面に差を出すための値である。今回の実験では表面が滑らかな素材に対して粗い素材の数が多かったことから写像性 0.25 mm の値が機能し

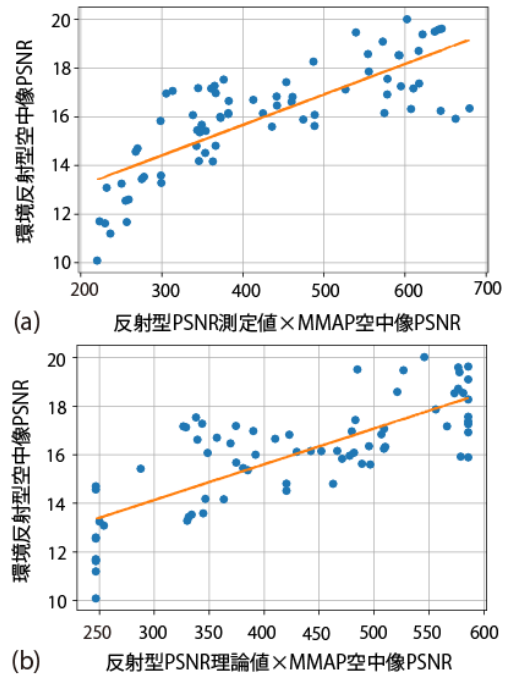


図 9 (a) 反射像 PSNR 測定値と環境反射型空中像 PSNR の関係
(b) 反射像 PSNR 理論値と環境反射型空中像 PSNR の関係

なかったと考えられる。ボケが高い反射像を表示する反射面を素材として追加することで, 写像性 0.25 mm も反射像 PSNR 測定値を説明するための変数となる可能性がある。

今回調査した θ_R について反射像 PSNR 測定値から環境反射型空中像の PSNR を説明できることがわかった。このことは式 (15) において決定係数が大きいことから説明できる。これにより仮説のように環境反射型空中像光学系における光源からの PSNR の低下について, MMAP での PSNR の低下と反射面での PSNR の低下から説明できることが示唆された。式 (15) から, 環境反射型空中像 PSNR は (反射像 PSNR 測定値) $\times$ (MMAP 空中像 PSNR) を用いて単回帰で示せることがわかった。これは白黒画像にブラーをかけていながら PSNR を測定しても 0 に近づくことは無く, 10 前後で横這いになることが原因だと考えられる。

今回調査した θ_R について反射像 PSNR 理論値から環境反射型空中像の PSNR を説明できることがわかった。このことは式 (16) において決定係数が大きいことから説明できる。これにより仮説のように環境反射型空中像 PSNR について, MMAP における PSNR の減衰率と反射面の写像性から説明できることが示唆された。

以上から, 今回調査した θ_R について環境反射型空中像の PSNR は写像性を用いて求められることがわかった。式 (14) から反射像 PSNR を求め, 式 (16) に代入することで求められる。

5. 考察

環境反射型空中像の特性である輝度と PSNR は、それぞれ反射面の特性である光沢度と写像性から求められることがわかった。ただし輝度の場合は $\theta_L = 35^\circ\text{--}60^\circ$ 、PSNR の場合は $\theta_R = 40^\circ$ での結果である。また、光源、光源と MMAP のみで表示された空中像についてそれぞれ輝度と PSNR が既知であることが条件である。

今回の結果を利用することで、元ある世界観に空中像を付加することが容易になる。反射面の特性を調査するだけでそこに表示される空中像の輝度や PSNR を知ることができ、空中像を表示することに適した場所であるか判断することができる。空中像の導入が容易になることで世界観を構築する要素として空中像が使用でき、エンタテインメント体験の向上に繋がると考えられる。

リミテーションとして、環境反射型空中像の特性について一部の入射角度でしか定式化できていないことが挙げられる。輝度について、光沢度 60° だけでなく他の角度についても値がわかれば定式化できる可能性がある。またボケについても、他の角度から撮影して分析することで定式化できると考えられる。

今後は、分析方法の改善と環境反射型空中像をシミュレーションするためにシミュレーターでの反射面の再現を目指す。回帰分析を用いて評価したが、最適な分析方法を見つけるために他の方法も試す必要があると考えている。また、今回の結果と空中像の見た目を再現するシミュレーターを組み合わせることで、異なる反射面に表示される空中像の見た目が再現できるシステムの作成を考えている。

6. 結論

本研究では、反射面の特性が環境反射型空中像の特性である輝度と PSNR についてどのような関係を持つか調査した。その結果、一部の観察角度について輝度と PSNR がそれぞれ反射面の特性である光沢度と写像性と関係があることがわかった。これにより環境反射型空中像を既存の場所に導入する際に手間であった特性の調査が容易になると考えられる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H04223 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Ayami Hoshi, Shunji Kiuchi, and Naoya Koizumi. *PicPop: A Pop-up Picture Book Comprising Mid-Air Images*, pp. 1–4. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2021.
- [2] Otsubo Makoto. Optical imaging apparatus and optical imaging method using the same. *U.S. Patent No. 8,702,252*, 2014.
- [3] Hanyuool Kim, Issei Takahashi, Hiroki Yamamoto,

- Satoshi Maekawa, and Takeshi Naemura. Mario: Mid-air augmented reality interaction with objects. *Entertainment Computing*, Vol. 5, No. 4, pp. 233 – 241, 2014.
- [4] Yasuaki Monnai, Keisuke Hasegawa, Masahiro Fujiwara, Kazuma Yoshino, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda. Haptomime: Mid-air haptic interaction with a floating virtual screen. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, p. 663–667, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [5] Yasutoshi Makino, Yoshikazu Furuyama, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda. Haptoclone (haptic-optical clone) for mutual tele-environment by real-time 3d image transfer with midair force feedback. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, p. 1980–1990, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [6] Hiroki Yamamoto, Hajime Kajita, Naoya Koizumi, and Takeshi Naemura. Enchantable: Displaying a vertically standing mid-air image on a table surface using reflection. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops & Surfaces*, ITS '15, p. 397–400, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [7] Amika Sano and Naoya Koizumi. Mid-air imaging technique for architecture in public space. *Electronic Imaging, Stereoscopic Displays and Applications XXIX*, pp. 111–1–111–9(9), 2018.
- [8] Naoya Koizumi and Ayaka Sano. Optical system to display mid-air images on a glossy plane and remove ground images. *Opt. Express*, Vol. 28, No. 18, pp. 26750–26763, Aug 2020.
- [9] Ryota Kakinuma, Norikazu Kawagishi, Masaki Yasugi, and Hirotugu Yamamoto. Influence of incident angle, anisotropy, and floating distance on aerial imaging resolution. *OSA Continuum*, Vol. 4, No. 3, pp. 865–878, Mar 2021.
- [10] Chao Gao, Xinzhu Sang, Xunbo Yu, Xin Gao, Jingyan Du, Boyang Liu, Li Liu, and Peiren Wang. Design, characterization, and fabrication of 90-degree viewing angle catadioptric retroreflector floating device using in 3d floating light-field display system. *Opt. Express*, Vol. 28, No. 17, pp. 24854–24873, Aug 2020.
- [11] Xin Gao, Xunbo Yu, Xinzhu Sang, Li Liu, and Binbin Yan. Improvement of a floating 3d light field display based on a telecentric retroreflector and an optimized 3d image source. *Opt. Express*, Vol. 29, No. 24, pp. 40125–40145, Nov 2021.
- [12] 日本規格協会. 鏡面光沢度-測定方法. 日本工業規格 JIS Z 8741, 1997.
- [13] Paints and varnishes – Determination of haze on paint films at 20° . Standard ISO 13803, International Organization for Standardization, 2014.
- [14] 日本規格協会. プラスチック-像鮮明度の求め方. 日本工業規格 JIS K 7374, 2007.
- [15] 向川康博. 反射・散乱の計測とモデル化. 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア], Vol. 172, pp. h1–h11, may 2010.
- [16] Seung-Hwan Baek, Tizian Zeltner, Hyun Jin Ku, Inseung Hwang, Xin Tong, Wenzel Jakob, and Min H. Kim. Image-based acquisition and modeling of polarimetric reflectance. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 39, No. 4, July 2020.
- [17] Christophe Schlick. An inexpensive brdf model for physically-based rendering. *Computer Graphics Forum*, Vol. 13, No. 3, pp. 233–246, 1994.