

5 自由度光線空間による照明シミュレーション

大矢 慎之介[†]岡部 孝弘[‡]

1 はじめに

物体の見えは、物体の形状や反射特性だけでなく、物体を照らす光源にも依存する。任意照明環境における写実的画像の生成のために、様々な照明条件で撮影された実写画像を重ね合わせの原理に基づいて組み合わせる、Image-Based Rendering (IBR) と呼ばれるアプローチがある。IBR では、多数の実写画像を必要とするものの、被写体の幾何学的・光学的モデルを介さずに実写画像から画像を生成するため、写実性の高い画像が得られる。

実シーンでは、様々な波長（色）の光が、様々な位置から様々な方向に飛び交っている。このような光で埋め尽くされた 3 次元空間は光線空間と呼ばれ、飛び交う光の強さは、時間変動を無視すると、位置 (x, y, z) 、方向 (θ, ϕ) 、および、波長 λ の 6 次元の関数で記述される。吸収や散乱の無視できるような空気中では、位置・方向の自由度のうち 1 つが冗長であるため、光線空間は 5 次元の関数で記述される。

そこで本稿では、位置・方向の 4 自由度と波長の 1 自由度を合わせた 5 自由度の能動照明により、任意照明環境におけるシーンの写実的画像を生成する手法を提案する。具体的には、リアプロジェクションディスプレイと透過型液晶からなる 5 自由度光源システム（図 1）を用いて、様々な位置から様々な方向に伝播する様々な色の光でシーンを照明したときの画像を撮影し、IBR の枠組みで任意照明環境における画像を生成する。5 自由度で光源を制御する提案手法により、光源の 3 次元位置や配光特性が変化したときの画像生成だけでなく、屈折・散乱・蛍光などの波長に依存する光学現象が観察されるシーンの画像生成も可能になる。

5 自由度光源システムを用いた IBR には、光線の自由度が高いために大量の画像を撮影する必要があること、および、光線の光量が小さいために各光線下における画像の SN 比が小さいことの 2 つの困難さがある。提案手法では、前者に関しては、互いに干渉しない光線を同時に生成することで、後者に関しては、多重化センシング [4] に基づく符号化照明を用いることで、大量の画像を効率

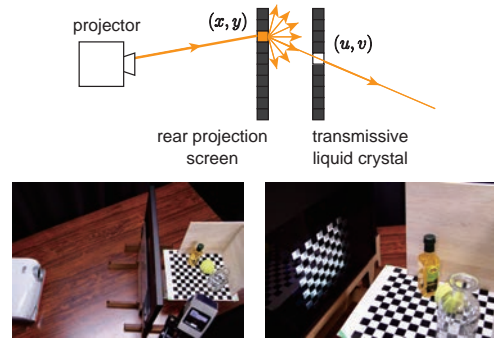


図 1: リアプロジェクションディスプレイと透過型液晶からなる 5 自由度光源システムの概念図（上）とプロトタイプ（下）。

良く獲得する。また、リアプロジェクションディスプレイと透過型液晶のオフセット（黒浮き）の影響を除去する方法も提案する。

2 関連研究

光線空間を生成する手法は、これまでに 3D ディスプレイの分野で数多く提案されている。例えば、Lanman ら [2] は 2 枚の透過型液晶を用いた視差障壁に基づく 3D ディスプレイを、Wetzstein ら [5] は複数の透過型液晶と指向性バックライトを用いた 3D ディスプレイを提案している。また、Hirsch ら [1] は、ライトフィールドプロジェクタと角度増幅スクリーンを用いて光線空間を生成する手法を提案している。これらの研究の目的は、3D ディスプレイのユーザが裸眼立体視できるように光線空間を生成することにある。一方、我々の目的は、光線空間を照明として用いて画像処理（本稿では照明シミュレーション）を行うことであり、上記のような 3D ディスプレイに関する研究とは異なる。

照明シミュレーションに関しては、Masselus ら [3] が、単一のプロジェクタと回転台等により、4 自由度で光源を動かして撮影した画像を用いて IBR を行っている。ところが、この手法では光源色を考慮していないため、波長に依存する光学現象を捉えることができない。また、多重化センシングの枠組みで効率的に画像を獲得すること

[†]九州工業大学 大学院情報工学府 先端情報工学専攻

[‡]九州工業大学 大学院情報工学研究院 知能情報工学研究系

も困難である. Zhou ら [6] は, 複数のプロジェクタとレンズアレイを用いて, 光源色も含めて 5 自由度の光線空間を生成し, オンラインの照明シミュレーションを行っている. しかしながら, プロジェクタのダイナミックレンジが限られていることから, この手法で生成することのできる光線空間のダイナミックレンジもまた限られてしまう.

3 提案手法

3.1 5 自由度光源システム

本研究では, プロジェクタとリアプロジェクションスクリーンからなるリアプロジェクションディスプレイの前面に透過型液晶を配置した 5 自由度光源システムを用いる (図 1). プロジェクタからリアプロジェクションスクリーン上の任意の位置 (x, y) に任意の色の光を投影すると, この光はスクリーンにおいて様々な方向に散乱される. このとき, 透過型液晶の任意の位置 (u, v) の透過率のみを 1 とし, 残りの透過率を 0 にすることで, 任意の位置 (x, y) と (u, v) を通過する任意の色の光線, つまり, 5 自由度の光線を生成することができる.

提案手法では, リアプロジェクションディスプレイと透過型液晶をそれぞれ, 画素ごとではなく N 個 (例えば $N = 64$) のブロックに分割して制御する. したがって, プロジェクタのバンド数を L (一般に $L = 3$) とすると, 5 自由度光源システムにより生成される光線の数は, $L \times N \times N$ (例えば $3 \times 64 \times 64 = 12288$) となる.

3.2 効率的な実写画像の獲得

IBR による写実的画像の生成のために, 各光線でシーンを照明したときの実写画像を獲得する. 単純には, プロジェクタの原色 (L 通り) ごとに, リアプロジェクションディスプレイにおいて発光するブロック (N 通り) と透過型液晶において透過率を 1 にするブロック (N 通り) を順に変化させながらシーンの画像を撮影することで, $L \times N \times N$ 枚の画像が得られる. リアプロジェクションディスプレイの各ブロックの明るさを並べた N 次元ベクトルを \mathbf{s} , 透過型液晶の各ブロックの透過率を並べた N 次元ベクトルを \mathbf{t} とすると, $N \times N$ 本の光線の強度は,

$$\mathbf{s} \otimes \mathbf{t} \quad (1)$$

のように直積で表現される. したがって, 単一の光線を生成する上記の手法では, 原色ごとに \mathbf{s} と \mathbf{t} の成分のうち 1 つずつを 1 にする (図 2).

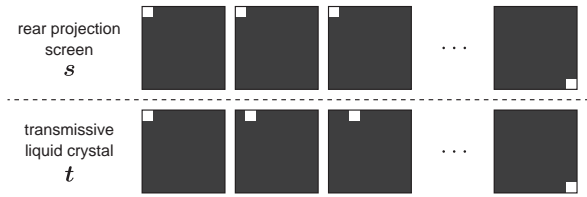


図 2: 単一の光線を生成する手法.

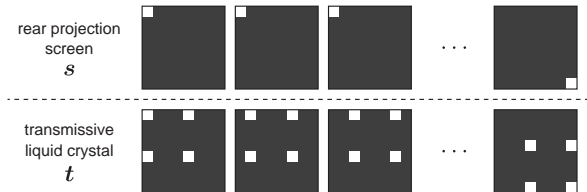


図 3: 複数の光線を同時に生成する手法.

ところが, 上記の単純な手法には, 光線の位置・方向の解像度を上げる, つまり, N を大きくしてブロックサイズを小さくするにつれて, 2 つの問題が生じる. 第一に, N が大きくなるにつれて, 撮影する画像の枚数が増大してしまう. 第二に, ブロックサイズが小さくなるにつれて各光線の光量も小さくなるため, 各光線下における画像の SN 比が小さくなってしまう.

前者の問題については, 互いに干渉しない光線を同時に生成することで, 撮影する画像の枚数を削減する. 具体的には, 5 自由度光源システムにより生成される光線にはシーンを照明しない余分な光線が含まれていることに着目し, 透過型液晶において複数のブロックの透過率を同時に 1 にすることで, 撮影する画像の枚数を削減する. 透過型液晶の前方のシーンを対象とするとき, リアプロジェクションスクリーンと透過型液晶のブロック間の距離や角度の関係から, 例えば, 4 つのブロックのうち最大でも 1 つを通過する光線のみがシーンを照明するようであれば, 必要な画像の枚数は $L \times N \times M$ 枚 ($M = N/4$) に削減される. 複数の光線を同時に生成する上記の手法では, \mathbf{s} の成分のうち 1 つだけを 1 に, \mathbf{t} については複数の成分を 1 にする (図 3).

後者の問題については, 撮影する画像の枚数を一定に保ったままで SN 比の高い画像を得ることができる多重化センシング [4] に基づく符号化照明を用いる. つまり, 上記の複数の光線を同時に生成する手法を多重化して, 符号化照明の下で撮影した画像を復号することで, 単一光線のみで照明されたときの画像を得る. 具体的には, アダマール行列に基づいて決定される S 行列により, \mathbf{s} と \mathbf{t} の特定の要素のみを 1 とする (図 4). さらに, 光源色に関しても符号化を行い, プロジェクタ投影光の色, 明るさ, および, 透過型液晶の透過率に関する 3 段階で符号

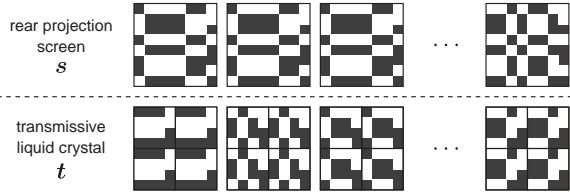


図4: 符号化照明でシーンを照らす手法.

化と復号を行う. 提案手法で生成する光線の強度は,

$$\mathbf{c} \otimes \mathbf{s} \otimes \mathbf{t} \quad (2)$$

で表現され, \mathbf{c} , \mathbf{s} , および, \mathbf{t} は, L , N , および, M の大きさの S 行列を用いて記述される.

3.3 オフセットの除去

一般に, プロジェクタやディスプレイでは, 入力画像の画素値を0にしても, わずかな光が漏れ出している. そのため, 5自由度光源システムにおいて, プロジェクタへの入力画素値を0にしたり, 透過型液晶の透過率を0にしたりしても, シーンを照明する光の強度は0にはならずオフセットが存在する. 各々の光線によるオフセットは小さいが, 光線の数が多いために, 結果としてオフセットの影響を無視することはできない. また, プロジェクタやディスプレイなどの2自由度光源を用いるときは, 入力画素値を0にしたときのシーンの画像との差分を取ることによってオフセットを容易に除去できるのに対して, 5自由度光源システムにおいてオフセットを除去する方法は明らかではない.

そこで, 5自由度光源システムにおけるオフセットを除去する手法を提案する. リアプロジェクションディスプレイと透過型液晶のオフセットをそれぞれ δ と ϵ で表すと, プロジェクタ投影光の実際の明るさ \mathbf{s}' と透過型液晶の実際の透過率 \mathbf{t}' は

$$\mathbf{s}' = \mathbf{s} + \delta \quad (3)$$

$$\mathbf{t}' = \mathbf{t} + \epsilon \quad (4)$$

となる. 所望の強度 $\mathbf{s} \otimes \mathbf{t}$ にこれらの式を代入すると,

$$\mathbf{s} \otimes \mathbf{t} = (\mathbf{s}' - \delta) \otimes (\mathbf{t}' - \epsilon) \quad (5)$$

$$= \mathbf{s}' \otimes \mathbf{t}' - \mathbf{s}' \otimes \epsilon - \delta \otimes \mathbf{t}' + \delta \otimes \epsilon \quad (6)$$

が得られる. したがって, オフセットを含む画像 ($\mathbf{s}' \otimes \mathbf{t}'$ に対応) から, プロジェクタ投影光の明るさと透過型液晶の透過率のどちらか一方を0にして撮影した2枚の画像 ($\mathbf{s}' \otimes \epsilon$ と $\delta \otimes \mathbf{t}'$ に対応) を引き, 両方を0にして撮

影した画像 ($\delta \otimes \epsilon$ に対応) を加えることで, オフセットを除去することができる. これにより, 必要な画像の枚数は $L \times (N + 1) \times (M + 1)$ となる.

3.4 任意照明環境画像の生成

獲得した実写画像を重ね合わせの原理に基づいて組み合わせることで, 任意照明環境における画像を生成する. 具体的には, リアプロジェクションスクリーンの n 番目の位置と透過型液晶の m 番目の位置を通過する l 番目の色の光線に照明されたシーンの画像 \mathbf{B}_{lnm} の線形結合

$$\mathbf{I} = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N w_{lnm} \mathbf{B}_{lnm} \quad (7)$$

により, 新たな画像 \mathbf{I} を得る. ここで, $w_{lnm} (\geq 0)$ は各画像の重みであり, 所望の5次元光線空間から求めることができる.

4 実験

リアプロジェクションディスプレイの前面に透過型液晶を配置した5自由度光源システム (図1) を実装し, 透明の瓶, テニスボール, および, 半透明の瓶などからなるシーン (図5) を対象として実験を行った. 実験では, 下記の3つの手法

- 単純な多重化 (オフセット除去あり)

図2の全ての単一光線を順に生成する手法を多重化したもので, 式(6)に基づいてオフセットの影響を除去する. 必要な画像は $L \times (N + 1) \times (N + 1)$ 枚である.

- 単純な多重化 (オフセット除去なし)

図2の全ての単一光線を順に生成する手法を多重化したもので, オフセットの影響を無視する. 必要な画像は $L \times N \times N$ 枚である.

- 提案手法

図3の複数の光線を生成する手法を多重化した図4のような符号化照明を用いるもので, オフセットの影響を除去する. 必要な画像は $L \times (N + 1) \times (M + 1)$ 枚である.

により獲得した実写画像を用いた. なお, $L = 3$, $N = 63$, および, $M = 15 \simeq N/4$ とした*.

まず, 白色の近接点光源下の画像を生成した (図5). 本稿では, (b) 単純な多重化 (オフセット除去あり) の結

*アダマール行列の存在する行列の大きさは限られる.

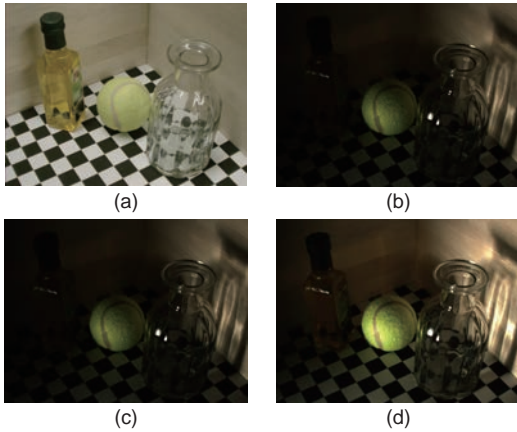


図 5: (a) 実験に用いたシーンの画像, および, 白色の近接点光源下の画像: (b) 真値, (c) 提案手法, (d) オフセットの影響を無視したとき.

果画像を真値とみなす. 提案手法で撮影する画像の枚数は, 単純な多重化 (オフセット除去あり) の約 1/4 であるにも関わらず, (c) 提案手法の結果画像が真値にほぼ等しいことが分かる. また, (d) オフセットの影響を無視したときの結果画像は, オフセットの影響を受けて全体的に明るくなっていることが分かる. (c) と (d) の PSNR はそれぞれ 54.12 と 30.05 であり, 定量的にも提案手法の有効性が分かる.

次に, 赤色, 緑色, および, 青色の近接点光源下の画像を生成した (図 6). (a) と (b) はそれぞれ光源の位置・方向のみを制御できる 4 自由度光源システムと光源の位置・方向だけでなく光源色も制御できる 5 自由度光源システム (提案手法) を用いて獲得した実写画像に基づいて生成した画像である. (a) では, 白色光源下の画像の R 成分, G 成分, および, B 成分を用いて, 赤色, 緑色, および, 青色の近接点光源下の画像を生成した. 青色の近接点光源下の画像を比較すると, 青色の光を吸収して黄色の光を放出する蛍光物体 (テニスボール) の見えが, (b) の 5 自由度光源システムではうまく再現できているのに対して, (a) の 4 自由度光源システムでは再現できていないことが分かる. このことから, 光源色の自由度も考慮する提案手法の有効性が分かる.

5 むすび

本稿では, リアプロジェクションディスプレイと透過型液晶を用いて光源の位置・方向と色を制御する 5 自由度光源システムにより, 任意照明環境におけるシーンの写実的画像を生成する手法を提案した. 特に, 効率的な実写画像の獲得方法とオフセットの影響を除去する方法

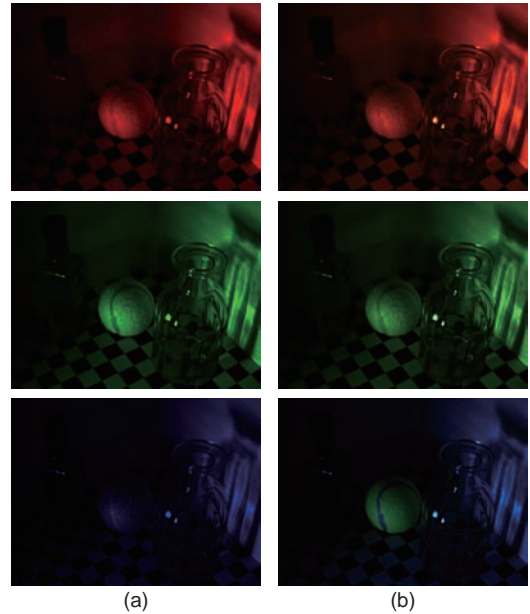


図 6: 赤色, 緑色, および, 青色の近接点光源下の画像: (a) 4 自由度光源システムと (b) 5 自由度光源システム.

を提案するとともに, プロトタイプを実装して提案手法の有効性を確認した. 波長分解能の向上 (光源のマルチスペクトル化) は今後の課題である.

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費 JP17H01766, JP16H01676, および, 一般財団法人テレコム先端技術研究支援センター (SCAT) の助成を受けた.

参考文献

- [1] M. Hirsch, G. Wetzstein, and R. Raskar, "A compressive light field projection system", In Proc. ACM SIGGRAPH 2014, Article No.58, 2014.
- [2] D. Lanman, M. Hirsch, Y. Kim, and R. Raskar, "Content-adaptive parallax barriers: optimizing dual-layer 3D displays using low-rank light field factorization", In Proc. ACM SIGGRAPH Asia 2010, Article No.163, 2010.
- [3] V. Masselus, P. Peers, P. Dutré, and Y. Willems, "Relighting with 4D incident light fields", In Proc. ACM SIGGRAPH2003, pp.613–620, 2003.
- [4] Y. Schechner, S. Nayar, and P. Belhumeur, "A theory of multiplexed illumination", In Proc. IEEE ICCV2003, pp.II-808–815, 2003.
- [5] G. Wetzstein, D. Lanman, M. Hirsch, and R. Raskar, "Tensor displays: compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting", In Proc. ACM SIGGRAPH 2012, Article No.80, 2012.
- [6] Z. Zhou, T. Yu, X. Qiu, R. Yang, and Q. Zhao, "Light field projection for lighting reproduction", In Proc. IEEE VR2015, pp.135–142, 2015.