

4次元ライトトランスポートの効率的な獲得と その照明シミュレーションへの応用

大矢 慎之介^{1,a)} 岡部 孝弘^{2,b)}

概要: 照明条件とシーンの見えの関係を記述するライトトランスポート (LT) を獲得することは、照明シミュレーション、シーンの見えの制御、および、光学的解析などへの応用において重要である。一般に、照明条件が4次元ライトフィールドで記述されるのに対して、従来は主に、2自由度しか持たないプロジェクタやディスプレイを光源とした2次元LTに関する研究が行われてきた。これに対して本研究では、2枚の透過型液晶を用いて光源を4自由度で制御するとともに、多重化センシングに基づいて4次元LTを効率的に獲得する。また、照明シミュレーションへの応用を行い、従来の2次元LTでは不可能であった3次元空間内を移動する光源下の見えの生成を実現する。

キーワード: ライトトランスポート, 4次元ライトフィールド, 多重化センシング, 照明シミュレーション

1. まえがき

光が光源からカメラまで伝播する様子、つまり、照明条件と画像の関係を記述したものは、ライトトランスポート (Light Transport: LT) と呼ばれる。LT を獲得することは、照明シミュレーション、シーンの見えの制御、および、シーンの光学的解析などの応用において重要である。

実シーンでは、様々な位置から様々な方向に光が飛び交っている。このような光で埋め尽くされた3次元空間はライトフィールドと呼ばれ、飛び交う光の強さは、位置 (x, y, z) と方向 (θ, ϕ) の5次元の関数で記述される。吸収や散乱の無視できる空気中では冗長な自由度があるため、ライトフィールドは4次元の関数になる。

ところが、従来のLTに関する研究では、主にプロジェクタやディスプレイが光源として用いられてきた。前者は方向 (θ, ϕ) 、後者は位置 (x, y) の2自由度しか持たないため、これらを用いて4自由度を持つ一般的な照明条件に対するLTを獲得することはできない。そのため、獲得した2次元LTの応用には、適用範囲や精度に大幅な制限・限界がある。

そこで本研究では、4自由度で制御した光源を用いてシーンを照明してその画像を撮影することで、4次元LTを獲得する。具体的には、2枚の透過型液晶を用いて光源を4自



図1 提案手法による照明シミュレーション結果の一例。透明物体や半透明物体の存在する複雑なシーンを青・緑・赤の指向性を持つ光源で照明したときの画像。

由度で制御することにより、4次元ライトフィールドを簡便に生成する。さらに、多重化センシングに基づいて、4自由度光源で照明されたシーンの画像を効率良く撮影する。

獲得した4次元LTを用いた照明シミュレーションを行い、提案手法の有効性を確認した。図1は、透明物体や半透明物体の存在する複雑なシーンを青・緑・赤の指向性を持つ光源で照明したときの画像を、提案手法を用いて生成したものである。LTを用いた照明シミュレーションでは、シーンの幾何学的・光学的なモデルを介さずに画像から画像を生成するため、写実的な画像が得られることが分かる。

2. 関連研究

2.1 3D ディスプレイ

透過型液晶を用いて4次元 (もしくは3次元) ライト

¹ 九州工業大学 大学院情報工学府 先端情報工学専攻

² 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

a) s_oya@pluto.ai.kyutech.ac.jp

b) okabe@ai.kyutech.ac.jp

フィールドを生成する手法は、これまでも 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 [7] 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、Jones ら [1] は、1 次元状に大量のプロジェクタを並べたプロジェクタアレイを用いて 3 次元ライトフィールド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 4 次元ライトフィールドを生成することにある。一方、我々の目的は、4 次元ライトフィールド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。

2.2 照明シミュレーション

Masselus ら [3] は、単一のプロジェクタと回転台等を用いた 4 次元 LT の計測手法を提案している。具体的には、プロジェクタの位置を被写体を取り囲むように 2 自由度で変化させながら、各々の位置で 2 次元 LT を獲得している。また、獲得した 4 次元 LT を用いた照明シミュレーションも行っている。

単一のプロジェクタを用いる手法では、物体表面上の各点には、相互反射などの大域成分を除けば、単一の方向のみから光が入射する。一般に、単一光源下の鏡面反射成分と拡散反射成分の輝度のコントラストは高いために、白とびや黒つぶれを避けるためには HDR 撮影が必要となる。一方、2 枚の透過型液晶を用いる提案手法では、多重化センシング [5] と組み合わせることで、物体表面上の各点には、様々な方向から光が入射する。一般に、特定の方向からの入射光のみが鏡面反射成分に寄与するのに対して、全ての方向からの入射光が拡散反射成分に寄与する。したがって、提案手法における鏡面反射成分と拡散反射成分の輝度のコントラストは低くなり、白とびや黒つぶれを避けるための HDR 撮影は不要になる。

Zhou ら [8] は、複数のプロジェクタとレンズアレイを用いて、実シーンを 4 次元ライトフィールドで照明する手法を提案している。透過型液晶を用いた提案手法が 4 次元 LT の獲得を介したオフラインの照明シミュレーションであるのに対して、彼らの手法ではオンラインの照明シミュレーションが可能である。一方で、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、彼らの手法で扱うことのできる 4 次元ライトフィールドのダイナミックレンジもまた限られてしまう。また、彼らの手法には、レンズの数を増やして 4 次元ライトフィールドの空間分解能を上げると、角度分解能が下がってしまうという問題もある。

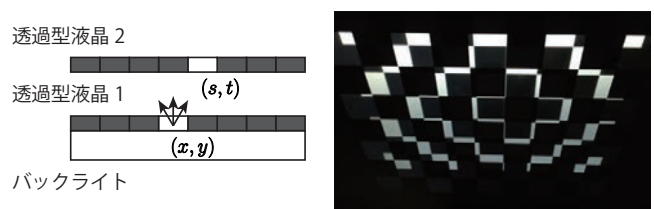


図 2 光源システム概念図 (左) と 2 枚の透過型液晶の透過率をチェッカーパターン状にしたときの見え (右)。

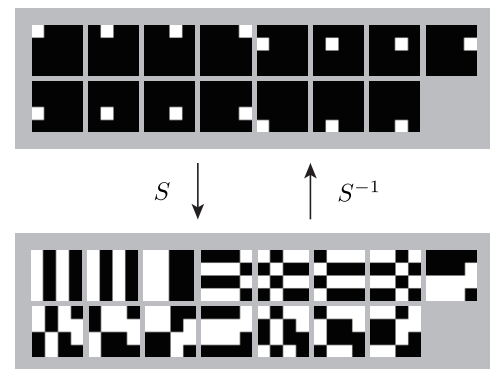


図 3 ブロック数 $M = 15$ のときの単一光源 (上) と符号化照明 (下)。

3. 提案手法

3.1 4 次元ライトフィールドの生成

4 次元ライトフィールドにおける光線は、2 つの平行な平面を通過する位置で表現することができる。そこで提案手法では、図 2 のように、液晶ディスプレイと透過型液晶からなる光源システムにより、4 次元ライトフィールドを簡便に生成する。

このシステムは、バックライトの前に 2 枚の透過型液晶を配置したものと考えることができる。透過型液晶の透過率を計算機により制御し、1 枚目の透過型液晶の任意の画素 (2 次元座標: x, y) と 2 枚目の透過型液晶の任意の画素 (2 次元座標: s, t) の透過率のみを 1、残りを 0 とすることで、任意の (x, y) と (s, t) を通過する光線、つまり、任意の 4 次元ライトフィールドを生成することができる。

3.2 4 次元ライトトランスポートの効率的な獲得

透過型液晶の透過率をブロック (例えば 10×10 画素の領域) 単位で 1 または 0 に制御することを考える。提案手法では、各透過型液晶の単一ブロックの透過率のみを 1 にして生成した“光線”により照明されたシーンの画像を獲得することを目指す。このとき、空間分解能を上げる、つまり、ブロックのサイズを小さくしてブロック数を増やすと、シーンに届く光量が減少するため、SN 比が小さくなったり露光時間が長くなったりしてしまう。2 枚の透過型液晶を用いる提案システムでは、この問題がより顕著になる。

そこで提案手法では、計測時間を一定に保ったままで SN

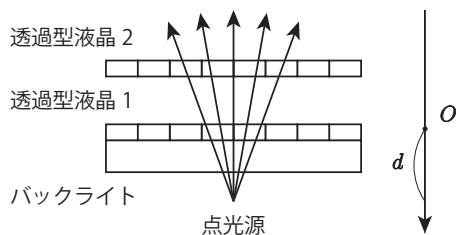


図 4 照明シミュレーションの概念図.

比を大幅に改善することができる多重化センシング [6] に基づいて画像を撮影する. 1枚の透過型液晶を用いて光源を2自由度で制御するときは, Schechner ら [5] のように, アダマール符号に基づいて決定される特定の組合せのブロックの透過率のみを1にしてシーンの画像を撮影し, 得られた符号化撮影画像を復号することで, 2次元LTを効率的に獲得することができる. 例えば, ブロック数 $M = 15$ のときは, 図3の単一光源(上)に対して S 行列を適用して得られる符号化照明(下)を用いて画像を撮影しておいて, 得られた符号化画像に S 行列の逆行列を適用すればよい. しかしながら, 2枚の透過型液晶を用いて光源を4自由度で制御するときの多重化センシングは自明ではない.

提案手法では, 上記の符号化照明の直積を用いて, 4次元LTを効率的に獲得する. 例えば, 各透過型液晶のブロック数 $M = 15$, つまり, 光線数 $N = M \times M = 225$ のときを考える. このとき, 1枚目の透過型液晶の透過率を図3(下)のように変化させながら, かつ, 透過率パターンごとに, 2枚目の透過型液晶の透過率もまた図3(下)のように変化させる. つまり, 符号化と復号化をそれぞれ2段階で適用する. なお, このときシーンに届く光量は, 全てのブロックの透過率を1にしたときの概ね $1/4$ になる.

4. 照明シミュレーションへの応用

獲得した4次元LTを用いた照明シミュレーションを行う. LTを用いた照明シミュレーションでは, シーンの幾何学的・光学的なモデルを介さずに画像から画像を生成するため, 写実的な画像が得られる. 従来の2次元LTを用いた照明シミュレーションでは, 光線の出射位置(プロジェクタの場合)や放射方向(ディスプレイの場合)が固定であった. これに対して, 4次元LTを用いた照明シミュレーションでは, 光源の位置も方向も任意に変更できる.

本稿では, 図4のように, 1枚目の透過型液晶から距離 d にある点光源に照明された画像を生成する. 具体的には, 重ね合わせの原理に基づいて,

$$I = \sum_{n=1}^N w_n B_n \quad (1)$$

のようにして, 単一光線に照明されたシーンの画像 $B_n (n = 1, 2, 3, \dots, N)$ の凸結合により, 所望の画像 I を生成する. ここで $w_n (\geq 0)$ は結合係数である.



図 5 光源システムとシーン.

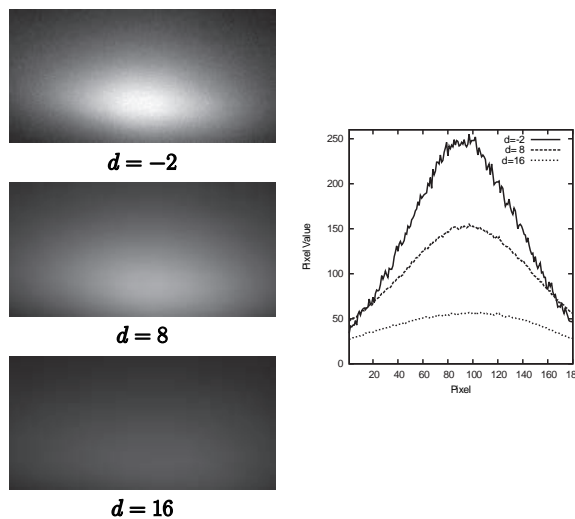


図 6 照明シミュレーションの結果: 平面.

結合係数は, 光源システムと点光源の幾何学的関係に基づいて決定する. 2枚の透過型液晶の3次元座標を事前に較正しておき, 点光源から仮想的に光線を飛ばしたときに各ブロック組を通過する数に応じて, 結合係数を決定する. 距離 d が大きくなるにつれて, 点光源は平行光線に近づき, 2枚の透過型液晶を垂直に通過する光線に対応する結合係数が相対的に大きくなる.

5. 実験

2枚の透過型液晶を用いた光源システムとシーンを図5に示す. 光源システムの前面に被写体を配置して, 各々の透過型液晶のブロック数を63個としたときの3969本の光線に対するLTを獲得した. 図6に, 平面を被写体としたときの照明シミュレーションの結果画像(左), および, ある断面における画素値の履歴(右)を示す. 被写体と点光源との距離が小さいとき ($d = -2$), 点光源は近接光源として振る舞っていることが分かる. 一方, $d = 8$, $d = 16$ と距離が大きくなるにつれて, 照度の逆二乗則のために画像が暗くなっていること, および, 平行光線に近づくために陰影が平坦になっていることが分かる.

次に, 平面の前方に左から, つや消し球, 石膏像, および, 鏡面球を置いたときの照明シミュレーションの結果画像(左), および, 蛍光灯下で観察したとき(上)と $d = 8$

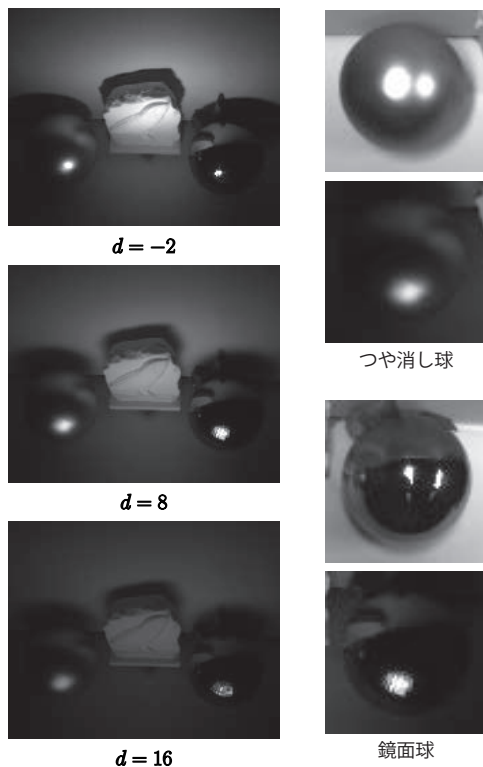


図 7 照明シミュレーションの結果：つや消し球（左）、石膏像（中）、および、鏡面球（右）。

のとき（下）のつや消し球と鏡面球の画像（右）を図 7 に示す。つや消し球と石膏像に関しては、図 6 と同様に、良好な結果が得られていることが分かる。しかしながら、鏡面球に関しては、周囲の物体の映り込みは表現できているものの、本来は点に見えるはずの点光源によるハイライトの表現には失敗している。したがって、3969本の光線数は、拡散反射などの鈍い反射成分を表現するには十分でも、鏡面反射などの極めて鋭い反射成分を表現するには不十分であることが分かる。

最後に、透明瓶（左）、半透明球（中央下）、半透明瓶（中央上）、および、オリーブオイルの入った瓶（右）を置いたときの照明シミュレーションの結果を図 8 示す。いずれの物体に対しても良好な結果が得られており、提案手法が幾何学的・光学的モデルの獲得が容易ではない被写体の照明シミュレーションにも有効であることが分かる。

6. むすび

本稿では、2枚の透過型液晶を用いて4次元ライトフィールドを生成するとともに、多重化センシングに基づいて4次元LTを効率良く獲得する手法を提案した。獲得した4次元LTを用いた照明シミュレーションを行い、提案手法の有効性を確認した。

今後は、鏡面反射物体の照明シミュレーションのために、4次元LTの空間解像度の向上や4次元LTの補間方法について検討したい。また、拡がりのある光源などを計測した4次元ライトフィールド [4] を用いた照明シミュレーショ

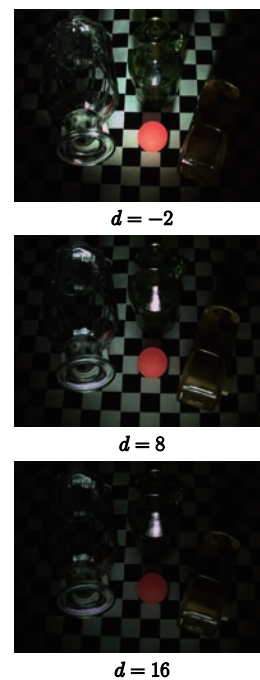


図 8 照明シミュレーションの結果：透明瓶（左）、半透明球（中央下）、半透明瓶（中央上）、および、オリーブオイルの入った瓶（右）。

ンにも取り組みたい。

謝辞 本研究の一部は、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] A. Jones, J. Unger, K. Nagano, J. Busch, X. Yu, H.-Y. Peng, O. Alexander, M. Bolas, and P. Debevec, “An automultiscopic projector array for interactive digital humans”, In Proc. ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies, Article No.6, 2015.
- [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 SIGGRAPH 2003, pp.613–620, 2003.
- [4] M. Nakamura, T. Okabe, and H. Lensch, “Acquiring 4D light fields of self-luminous light sources using programmable filter,” In Proc. LF4CV2014 (LNCS 8926), pp.588–599, 2014.
- [5] Y. Schechner, S. Nayar, and P. Belhumeur, “A theory of multiplexed illumination”, In Proc. IEEE ICCV2003, pp.II-808–815, 2003.
- [6] N. Sloane, T. Fine, P. Phillips, and M. Harwit, “Codes for multiplex spectrometry,” Applied Optics, 8(10), pp.2103–2106, 1969.
- [7] 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.
- [8] Z. Zhou, T. Yu, X. Qiu, R. Yang, and Q. Zhao, “Light field projection for lighting reproduction”, In Proc. IEEE VR 2015, pp.135–142, 2015.