

透過型液晶パネルを用いた4次元ライトトランスポートの獲得

大矢 慎之介 岡部 孝弘
九州工業大学 情報工学部

1 はじめに

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自由度光源に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。

2 関連研究

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手法は、これまでも3次元ディスプレイの分野で提案されている。例えば、Lanmanら[1]は2枚の透過型液晶を用いた3次元ディスプレイを、Wetzsteinら[3]は3枚の透過型液晶を用いた3次元ディスプレイを提案している。これらの研究は、3次元ディスプレイのユーザが裸眼立体視できるように、高精度な4次元ライトフィールドを生成することが目的である。一方、我々の目的は、3次元ディスプレイ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、上記の研究とは異なる。

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1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

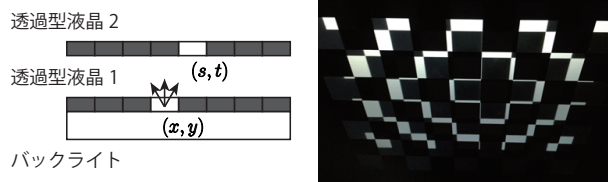


図1: 光源システムの概念図 (左) と2枚の透過型液晶の透過率をチェッカーパターン状にしたときの見え (右)。

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、空間解像度を上げる、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比を大幅に改善することができる多重化センシング [2] を用いて画像を撮影する。具体的には、透過型液晶ごと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。従来の2次元LTを用いた照明シミュレーションでは、光源の位置 (プロジェクタの場合) や方向 (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2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

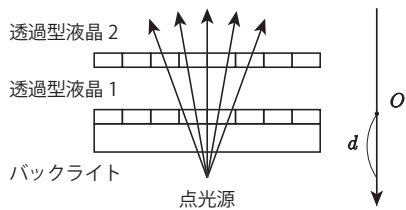


図 2: 照明シミュレーションの概念図.

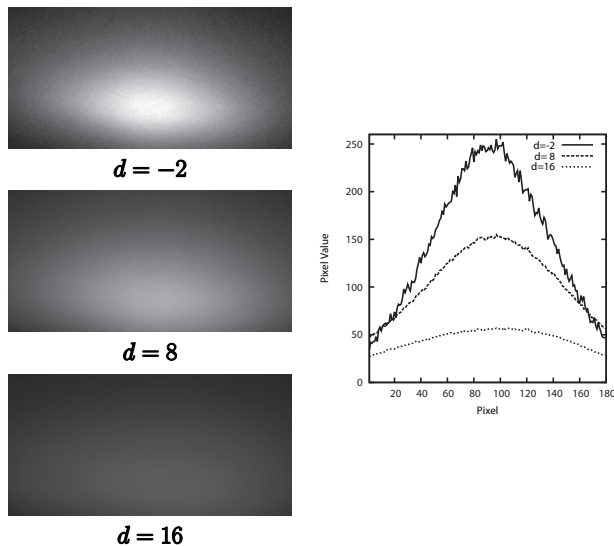


図 3: 照明シミュレーションの結果：平面.

$b_n (n = 1, 2, 3, \dots, N)$ 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。

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

各々の透過型液晶のブロック数を63個として、3969本の光線に対するLTを獲得した。図3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。

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 $d = 8$ のとき(下)のつや消し球と鏡面球の画像(右)を図4に示す。つや消し球と石膏像に関しては、図3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ないものの、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。

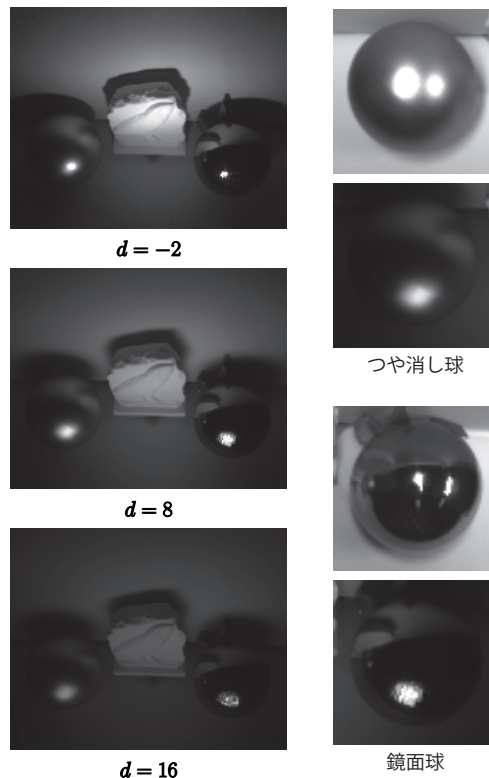


図 4: 照明シミュレーションの結果：つや消し球・石膏像・鏡面球.

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。

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、提案手法の有効性ならびに限界を確認した。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、計測した4次元ライトフィールドを用いた照明シミュレーションにも取り組みたい。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Y. Schechner, S. Nayar, and P. Belhumeur, "A theory of multiplexed illumination", In Proc. IEEE ICCV2003, pp.II-808-815, 2003.
- [3] 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.