

# 自発光光源の4次元ライトフィールドの適応的計測

中村 基裕<sup>†</sup>

Motohiro Nakamura

岡部 孝弘<sup>‡</sup>

Takahiro Okabe

## 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。したがって、実世界光源のモデルを獲得することは、CVにおけるイメージベースモデリングやCGにおける写実的画像生成において極めて重要である。

従来、CVやCGの分野では、点光源や平行光線（無限遠方点光源）などの大きさを持たない理想的な光源を仮定して画像の解析・生成を行うことが多かった。しかしながら、LEDなどの微小光源を除けば、実世界光源の多くは一定の大きさを持ち、被写体から有限の距離に位置するため、点光源や平行光線のような理想的な光源を仮定した画像の解析・生成は正確ではない。

そこで我々は、実世界光源下における画像の解析・生成をより正確に行うために、一定の大きさを持つ自発光光源の放射強度分布を計測する手法を提案した [3]。大きさを持つ光源の放射強度分布は4次元ライトフィールドで記述され、例えば図1左に示すように、2つの平行な平面の位置  $(x, y)$  と  $(s, t)$  を通過する光の強度  $L(x, y, s, t)$  として表現される。我々の従来手法では、図1右に示すように、動的な透過フィルタである液晶パネルと拡散反射板からなる装置を用いて、光源から放たれた光が液晶パネルを透過して拡散反射板に入射するときに、その反射光の明るさを手掛かりにして4次元ライトフィールドを求める。

我々の従来手法は、液晶パネルの透過率を空間的・時間的に自在に制御できるという特長を活かして、多重化センシング [5] の枠組みで、4次元ライトフィールドを高いSN比で計測する。具体的には、フィルタを大きさの等しいパッチに分割して、それらの透過率をある特定のパターンで0または1に変化させながら撮影した拡散反射板の画像から4次元ライトフィールドを求める。ところが、一般に、実世界光源の放射強度分布は様ではないため、各パッチを通過する光の量や角度分布もまた様ではない。したがって、フィルタを大きさの等しいパッチに分割して一様な空間解像度でライトフィールドを計測すると、ライ

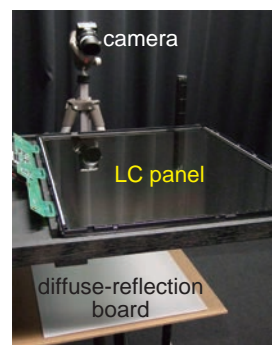
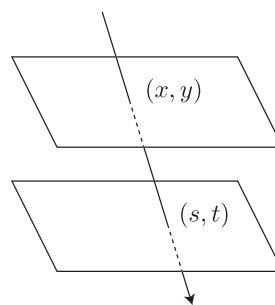


図1: 4次元ライトフィールドの表現（左）と液晶パネルと拡散反射板からなる計測装置（右）。

トフィールドの高周波数成分が失われてしまうという問題や高周波数成分を計測するためには分割数が膨大になってしまうという問題が生じる。

そこで本稿では、フィルタの透過率を空間的・時間的に自在に制御できるという特長をさらに活かして、光源の特性に応じて非一様な空間解像度でライトフィールドを適応的に計測する手法を提案する。具体的には、各パッチの透過率のみを1としたときの拡散反射板の画像の明るさや周波数特性に基づいて各パッチの重要度を定義して、重要度の高いパッチを分割することを繰り返すことで、空間解像度を適応的に変化させて計測を行う。

本稿の構成は以下のとおりである。第2節で関連研究を整理して提案手法の位置付けを明らかにする。第3節では適応的に計測を行う提案手法を説明する。第4節で実験結果を報告して、第5節でむすぶ。

## 2 関連研究

大きさを持つ光源は、光源の“表面”上の様々な点から様々な方向に光を放射している。したがって、大きさを持つ光源のモデリングのためには、4次元ライトフィールドを広範囲で、かつ、密に計測することが鍵となる。

これまでに、光源の放射強度分布の計測に特化していない、一般的な4次元ライトフィールドの計測手法が提案されている。一つは、図2(a)のようにカメラアレイ [7] や

<sup>†</sup>九州工業大学大学院情報工学府先端情報工学専攻

<sup>‡</sup>九州工業大学大学院情報工学府知能情報工学研究室

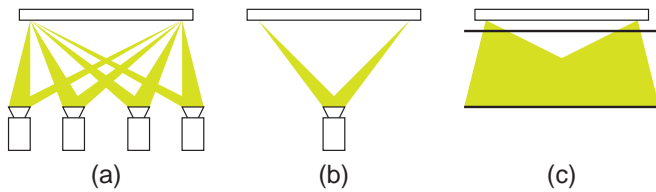


図2: 代表的な4次元ライトフィールド計測手法で大きさのある光源を計測したときの計測可能範囲: (a) カメラアレイ, (b) ライトフィールドカメラ, および, (c) 提案手法.

鏡面球アレイ [6] を用いるアプローチで, もう一つは, 図2(b)のように, マイクロレンズアレイ [4] や符号化開口 [2] を用いるアプローチ (ライトフィールドカメラ) である. これらの図では, 各アプローチについて, 光源のある2点から放射される光を計測できる範囲を示している. 前者 (a) は広範囲のライトフィールドを獲得できるが, カメラや鏡面球を密に配置することが困難であるために, 密に計測することができない. 一方, 後者 (b) はライトフィールドをある程度密に計測することができるが, センサのサイズが限られることから, 広範囲の計測は不可能である.

これに対して Goesele ら [1] は, 透過フィルタと拡散反射板を用いた図2(c)のような計測装置を提案している. この装置は, 4次元ライトフィールドを広範囲で, かつ, 密に計測できるという利点があるが, 静的な透過フィルタを手動で動かしながら計測を行っているために, 密な計測・効率的な計測は容易ではない. 我々の計測装置も図2(c)と同じ構成であるが, 動的な透過フィルタである液晶パネルを用いることで, 上記の利点に加えて, 透過率を空間的・時間的に自在に制御できるという利点もある.

### 3 提案手法

#### 3.1 基本的な計測手法

図1右の計測装置を用いた最も基本的な計測手法は, フィルタを大きさの等しいパッチに分割し, 図3上に示すように単一パッチの透過率を順に1にして, 拡散反射板の画像を撮影するものである. 液晶パネル上の位置が図1左の  $(x, y)$  に, 拡散反射板上の位置が  $(s, t)$  に対応することから, これらの画像から4次元ライトフィールドを求めることができる.

しかしながら, この基本的な計測手法には問題がある. ライトフィールドを密に計測するためには透過率を1とするパッチのサイズを小さくする必要があるが, サイズを小さくすればするほど, 拡散反射板に到達する光量もまた小さくなってしまふ. したがって, 計測時間を一定に保った

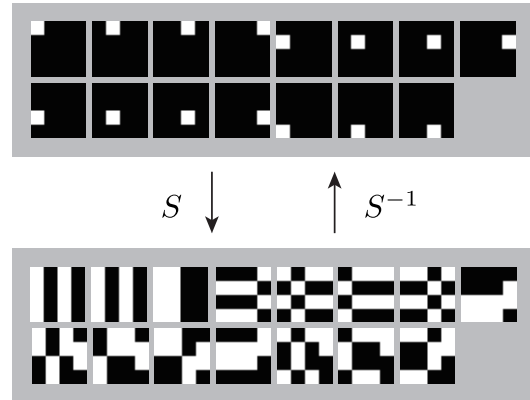


図3: 基本的な計測手法 (上) と多重化センシング (下) で用いるフィルタ (パッチの総数  $N = 15$  のとき).

ままでサイズを小さくすると, 光量が不足するためSN比が悪化してしまう. 一方, SN比を一定に保ったままでサイズを小さくするには, 光量を稼ぐために露光時間を長くする必要がある. 以上のように, ライトフィールドを密に計測しようとする, 精度 (SN比) もしくは効率 (計測時間) のいずれかが犠牲になってしまう.

#### 3.2 多重化センシング

上記のトレードオフを解決するために, 我々の従来手法では, 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のできる手法として知られる多重化センシング [5] を用いた. 具体的には, 図3下に示すように, 各パッチの透過率を  $S$  行列で記述される特定のパターンで0または1に変化させながら拡散反射板を撮影する. 撮影した画像に  $S$  行列の逆行列を適用して復号処理を行い, 図3上のように, 単一パッチの透過率のみを1としたときの拡散反射板の画像を得る. 多重化センシングのSN比  $\text{SNR}_{\text{multi}}$  と基本的な計測手法 (シングルセンシング) のSN比  $\text{SNR}_{\text{single}}$  の関係は, パッチの総数  $N$  が大きいときに,

$$\frac{\text{SNR}_{\text{multi}}}{\text{SNR}_{\text{single}}} \simeq \frac{\sqrt{N}}{2} \quad (1)$$

となることが知られている.

#### 3.3 適応的な計測手法

基本的な計測手法と多重化センシングでは, フィルタを大きさの等しいパッチに分割して, 一様な空間解像度でライトフィールドを計測している. ところが, 一般に, 実世界光源の放射強度分布は一様ではないため, 各パッチを通過する光の量や角度分布もまた一様ではない. そこで,

フィルタの透過率を空間的・時間的に自在に制御できるという特長をさらに活かして、光源の特性に応じて非一様な空間解像度で効率良く計測を行う適応的手法を提案する。

具体的には、後で述べる各パッチの重要度に基づいて、以下の手順でフィルタを適応的に分割しながら計測を行う。

1. 初期パッチ数を  $n$  として多重化センシングを行う。
2. 全てのパッチから重要度が高い順に  $m$  個のパッチを選択して、各々を 4 分割する。したがって、パッチの総数は  $3m (= 4m - m)$  個増加する。
3. 新たに分割された  $4m$  個のパッチを対象として多重化センシングを行う。このとき、必要な計測回数は増加したパッチの数  $3m$  に等しい\*。
4. パッチの総数が  $N$  になるまで 2 と 3 を繰り返す。

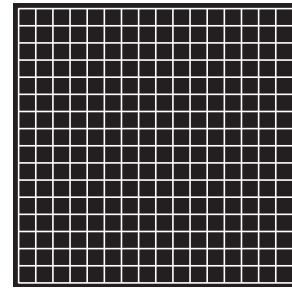
各パッチの重要度は、各パッチの透過率のみを 1 としたときの拡散反射板の画像に基づいて、

$$\sum_{u,v} |F(u,v)|^2 \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

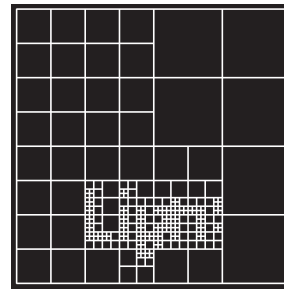
のように定義する。つまり、拡散反射板の画像を離散フーリエ変換したときのパワースペクトル  $|F(u,v)|^2$  に高周波数成分を強調する重み  $\sqrt{u^2 + v^2}$  を付けて和を取ったものを重要度とすることで、通過する光の量が多く、かつ、角度分布が複雑なパッチを分割する。

パッチの総数を  $N$  に揃えたときの、適応的な計測手法と多重化センシングのメリットとデメリットを整理する。まず、いずれの手法も  $N$  枚の画像を要することから、1 枚の画像を撮影する際の露光時間が等しいければ総露光時間も等しい。次に、計算コストについて、最も計算量の大きい復号処理のコストを比較する。多重化センシングでは  $N$  行  $N$  列の  $S$  行列の逆行列と  $N$  次元ベクトルの積を計算するため、計算量は  $O(N^3)$  となる。一方、適応的計測では、初期の多重化センシングに加えて、分割を  $(N - n)/3m$  回繰り返してその度に多重化センシングを行うことから、計算量は  $O(n^3 + (N - n)/3m \times (3m)^3)$  となる。ここで  $N \gg n$  および  $n \simeq m$  とすると、計算量は  $O(Nm^2)$  となる。 $N \gg m$  であるから、適応的な計測は多重化センシングよりも計算コストが小さい。最後に、SN 比については、多重化センシングが  $\sqrt{N}/2$  であるのに対して適応的な計測は  $\sqrt{3m}/2$  であり、多数のパッチを同時に扱う多重化センシングの方が優れている。

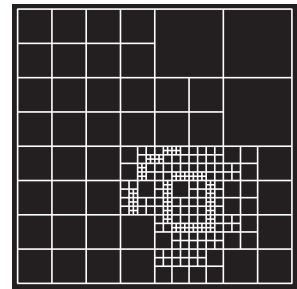
\*1 個の親パッチを 4 個の子パッチに分割するとき、親パッチの透過率のみを 1 としたときの拡散反射板の画像は、4 個の子パッチの透過率のみを順に 1 としたときの拡散反射板の 4 枚の画像の和に等しいため。



(a)



(b)



(c)

図 4: フィルタの分割結果: (a) 多重化センシング, (b) 適応的計測 (プロジェクタ), および, (c) 適応的計測 (懐中電灯)。

## 4 実験

提案手法の有効性を確認するために、プロトタイプシステムを実装して、実世界光源の 4 次元ライトフィールドを計測した。比較的単純な放射強度分布を持つプロジェクタ<sup>†</sup>と比較的複雑な放射強度分布を持つ懐中電灯を対象とした。

### 4.1 フィルタの適応的分割

図 4 に、 $N = 255$ ,  $n = 15$ , および、 $m = 4$  としたときのフィルタの分割結果を示す。一様な空間解像度で計測を行う多重化センシング (a) に比べて、提案手法 (b)(c) が非一様な空間解像度で計測を行っていることが分かる。特に、(b) ではプロジェクタから投影した“Light”の文字に沿ってフィルタが細かく分割されていること、および、(c) では懐中電灯の中心軸に沿ってほぼ軸対称にフィルタが分割されていることが分かる。

### 4.2 画像の再構成

次に、図 5 と図 6 に、獲得した 4 次元ライトフィールドを用いて画像を再構成した結果を示す。具体的には、括

<sup>†</sup>被写界深度が浅いために点光源であるとはみなせない。

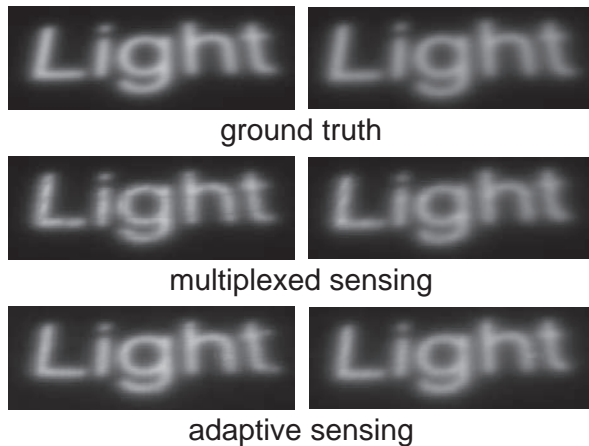


図5: 獲得したライトフィールドを用いて生成した画像: プロジェクタ.

散反射板を計測時と異なる高さにしたときの画像を生成した.

図5はプロジェクタの結果で, 左列(右列)は, 拡散反射板を光源に近づけた(光源から遠ざけた)ときにフィルタの透過率を全て1にした場合に得られる画像である. 上段の正解画像<sup>‡</sup>と比較して, 中段の多重化センシングの結果には, 解像度が不足しているために生じるブロック状のアーチファクトが観察される. 一方, 下段の適応的計測の結果は, 上段の正解画像と類似しており, 定性的には提案手法の有効性を確認することができる. 図6の懐中電灯の結果においても, 適応的計測の結果が正解画像に類似しているのに対して, 多重化センシングの結果(特に左側)にブロック状のアーチファクトが発生していることから, 提案手法の有効性が見られる.

## 5 むすび

本稿では, 液晶パネルと拡散反射板からなる装置を用いて, 大きさのある実世界光源の放射強度分布を効率良く計測する手法を提案した. 具体的には, フィルタの透過率を空間的・時間的に自在に制御できるという特長を活かして, 4次元ライトフィールドを光源の特性に応じた非一様な空間解像度で適応的に計測する手法を提案した. また, プロトタイプシステムを実装して, 提案手法の有効性を確認した. 獲得したライトフィールドの画像の解析・生成への応用は今後の課題である.

**謝辞** 本研究の一部は, コニカミノルタ画像科学奨励賞の助成を受けた.

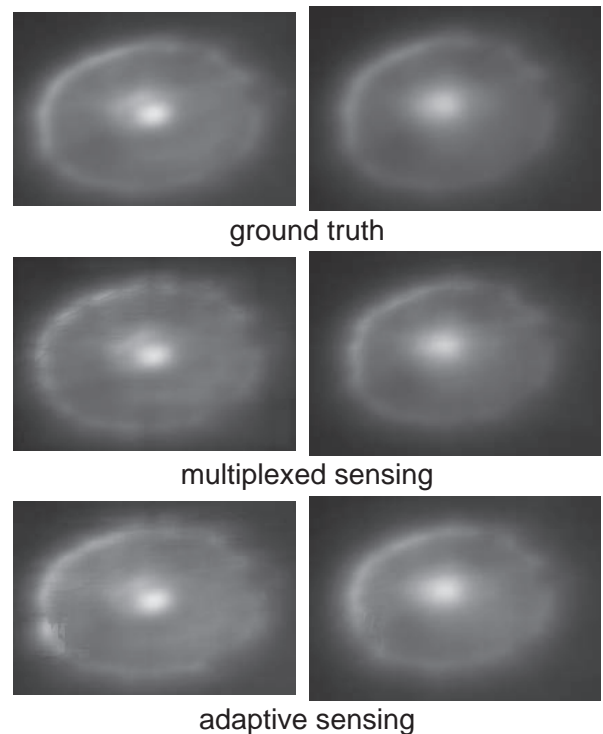


図6: 獲得したライトフィールドを用いて生成した画像: 懐中電灯.

## 参考文献

- [1] M. Goesele, X. Granier, W. Heidrich, and H. Seidel, "Accurate light source acquisition and rendering," In *Proc. ACM SIGGRAPH2003*, pp.621-630, 2003.
- [2] C.-K. Liang, T.-H. Lin, B.-Y. Wong, C. Liu, H. Chen, "Programmable aperture photography: multiplexed light field acquisition," In *Proc. ACM SIGGRAPH2008*, 2008.
- [3] M. Nakamura, T. Okabe, and H. Lensch, "Acquiring 4D light fields of self-luminous light sources using programmable filter", In *Proc. the 1st Workshop on Light Field for Computer Vision (LF4CV2014)*, LNCS 8926, pp.588-599, 2014.
- [4] R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," *Stanford Tech Report CTSR 2005-02*, 2005.
- [5] Y. Schechner, S. Nayar, and P. Belhumeur, "A theory of multiplexed illumination," In *Proc. ICCV2003*, pp.808-815, 2003.
- [6] J. Unger, A. Wenger, T. Hawkins, A. Gardner, and P. Debevec, "Capturing and Rendering with Incident Light Fields," In *Proc. EGSR2003*, pp.1-10, 2003.
- [7] B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, E.-V. Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz, and M. Levoy, "High performance imaging using large camera arrays," In *Proc. ACM SIGGRAPH2005*, pp.765-776, 2005.

<sup>‡</sup>それぞれの高さにおける拡散反射板の実画像