

放射輝度分離による 4 次元ライトフィールドの再構成

青砥 隆仁^{1,a)} 佐藤 智和^{1,b)} 向川 康博^{1,c)} 横矢 直和^{1,d)}

1. はじめに

物体上で観測される明るさは物体の幾何形状、反射特性、光源環境によって決定される。従って、陰影情報から物体の形状や反射特性の解析を行うためには、シーンの光源環境を獲得・再現することが必要不可欠である。従来、CV や CG の分野では、平行光源モデルや点光源モデルなど比較的単純な光源モデルが広く用いられてきたが、現実世界の光源は非等方的な放射強度や大きさを持つため、これらのモデルを用いて光源情報を近似することは難しい。これを解決するには、光源を 4 次元のライトフィールドとしてモデル化し、そのパラメータを計測・推定する必要がある。本研究では、幾何形状、反射特性が既知の物体上で観測される輝度情報から 4 次元のライトフィールドを推定するインパースレンダリングに基づく手法を提案する。

2. 基本的なアイデアと線形解法による問題点

4 次元のライトフィールドは、光線が通過する面上の位置 (2 次元) とその位置を通過する方向 (2 次元) で表現される。ここでは、光線が通過する面を仮想面光源と呼ぶ。図 1 に示すように、仮想面光源から放射された光は、透過特性が既知の拡散透過板を透過し、カメラ上で観測される。この時、拡散透過板上で観測される放射輝度は、拡散透過板の透過率を重みとした観測位置に入射する光線強度の和として表現できる。よって、観測輝度ベクトルを $o \in \mathbb{R}^N$ 、光線強度ベクトルを $s \in \mathbb{R}^M$ とすると、 o と s の関係は $o = As$ として表現される。ここで A はレンダリングプロセスを表現する行列であり、カメラ・拡散透過板・光源の位置・姿勢と拡散透過板の透過特性が既知である時、一意に決定される。

A のランクが M である時、理論上は s を決定することができる。ただし、 M の数は仮想面光源の空間分解能と角度分解能の積で決定されるため、解を得るには膨大な観測と計算リソースが必要となる。このような問題を回避する

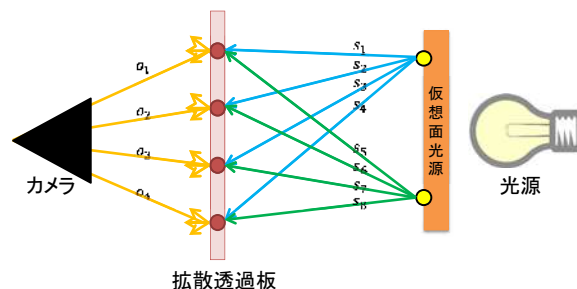


図 1 提案手法の概念図。各観測輝度は各光線の重み付き線形和として表現することができる。

ためには、未知パラメータを減らすことが有効である。我々は、未知パラメータを減らすために、微小領域から放射される放射輝度分布を球面調和関数を用いて近似し、線形に解く手法を提案している [1]。しかし、光線強度が負になるなど望ましくない結果が得られるという問題があった。

そこで本研究では、光線強度は物理的な制約から非負値であり、その光線強度の上限もその光線が通過する光線強度から推定可能であるという物理的な制約を解法に正則化として組み込む。これにより、ライトフィールド再構成問題を凸最適化問題として定式化し、少ない観測においてもより精度の高いライトフィールドの再構成を実現する。

3. 凸最適化によるライトフィールド再構成

仮想面光源上の微小領域から放射される放射輝度分布を球面調和関数を用いて近似したとする。いま、未知の球面調和関数の係数 $c \in \mathbb{R}^{\hat{H}}$ に対して、球面調和関数を用いたレンダリングプロセス $B: \mathbb{R}^{\hat{H}} \mapsto \mathbb{R}^M$ 、付加雑音 $e \in \mathbb{R}^N$ 、および観測輝度データ $o = Bc + e$ が与えられたとすると、本稿で提案するライトフィールドの再構成法は、以下のように定式化される。

$$\min_c \|o - Bc\|_2^2 + \lambda \|c\|_1 + \nu_Y(Yc), \quad (1)$$

ここで、 $\|\cdot\|_1$ は l_1 ノルム、 ν_Y は指示関数、 Y は球面調和関数の基底、 Yc は仮想面光源から放射される放射輝度であるライトフィールドをそれぞれ表している。これを解くことによってライトフィールド Yc を得ることができる。なお、上記の各正則化項の役割を以下に示す。

$\|c\|_1$: l_1 ノルムは、球面調和関数の基底に対して定義される係数 c の絶対和である。ある信号を基底と係数の積

¹ 奈良先端科学技術大学院大学 〒630-0101 奈良県生駒市高山町 8916-5

a) takahito-a@is.naist.jp

b) tomoka-s@is.naist.jp

c) mukaigawa@is.naist.jp

d) yokoya@is.naist.jp

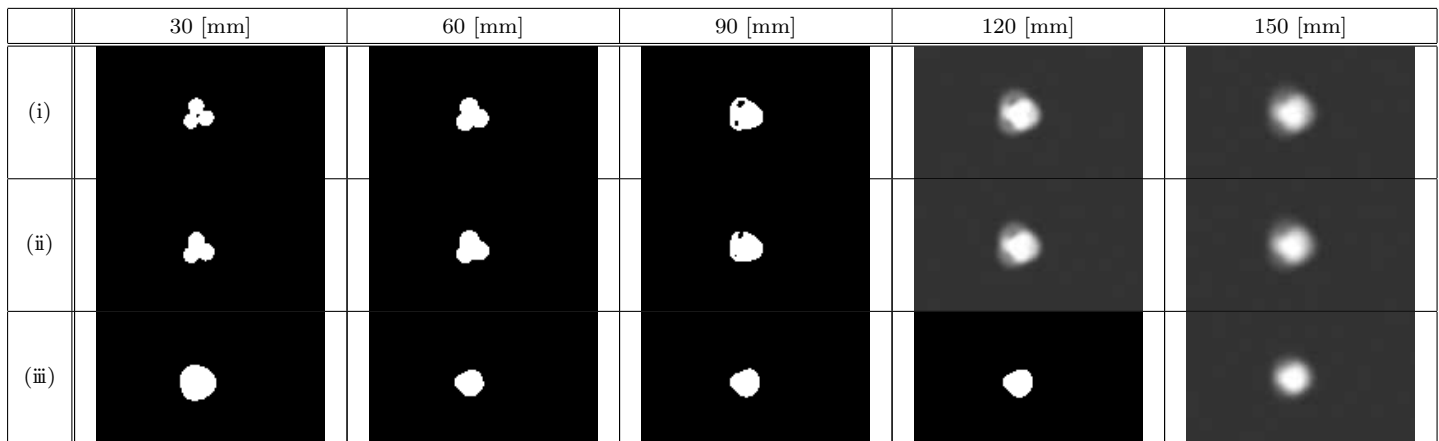


図 3 入力画像とリライティング画像. (i): 入力画像. (ii) 4D ライトフィールドを推定した結果からリライティングした画像 (提案手法). (iii) 2D ライトフィールドを推定した結果からリライティングした画像.



図 2 実験環境外観図. 光源はリフレクターとレンズを持つ.

で表現するとき、過適合を避けるために係数なるべく小さくすることが良いとされており、そのため、 c の絶対和を正則化項として用いる.

$\nu_Y(Yc)$: 光線強度が取りうる値を制限するために、以下のような閉凸集合を考える.

$$\mathcal{V} = \{x \in \mathbb{R}^N | x_i \in [0, T_i]\}$$

指示関数 ν_Y は、入力が特定の集合 \mathcal{V} に属する場合に 0、そうでない場合には ∞ を取る関数であり、指示関数がある最小化問題に組み込むことは、解をその集合上に限定した上で元の最小化問題を考えることに相当する. 光線 i における光線強度の最大値 T_i は、その光線しか存在しないという仮定のもとで、その光線が通過する拡散透過板上で観測された輝度値から光線強度を推定することにより求められる.

4. 実験

図 2 に示すような実環境において、カメラに対して拡散透過板を正対した状態で設置し、獲得した複数枚の画像 (図 3 (i)) を元にライトフィールドを再構成し、獲得されたライトフィールドを元にリライティングを行った. 汎化性能を確認するために実験では、図 4 に示した配置で、解像度 257×364 の画像を 5 枚撮影し、そのうちの画像 4 枚 (距離 60mm, 90mm, 120mm, 150mm) を入力として用いた. また、拡散透過板の透過特性としてランバート拡散を用い

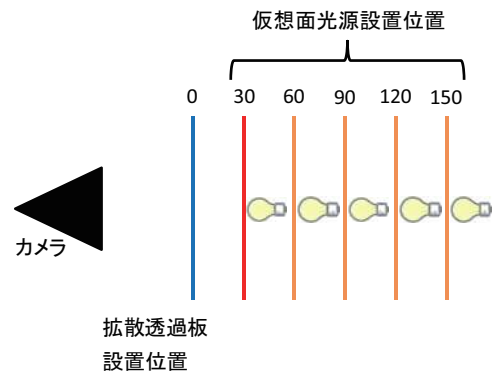


図 4 実験設定. 青線: 拡散透過板設置位置. 赤線: 比較用画像用の仮定面光源設置位置. 黄色線: 入力画像用の仮定面光源設置位置.

た. 図 3 に入力画像と提案手法によって獲得されたライトフィールドからリライティングした結果と、比較手法として非等方な点光源を仮定して 2D のライトフィールドを獲得しリライティングした結果を示す. ただし提案手法は、仮定面光源を 257×364 に標本化している. 図 3 (i) の画像より距離を変えて撮影した際、明るさだけでなく模様も変化していることからこの光源が複雑なライトフィールドを持つことがわかる. ここで、2D ライトフィールドを復元する手法では距離に応じて模様に変化する光源に対応することができず、全体としてボケた状態となっておりその細部が失われている (図 3 (iii)). 一方、提案手法では高周波な成分まで復元されており、入力に用いなかった距離 30mm でも良好なリライティング結果が得られていることが確認できる (図 3 (ii)).

参考文献

[1] T. Aoto, T. Sato, Y. Mukaigawa, and N. Yokoya: "Linear estimation of 4-D illumination light field from diffuse reflections", Proc. IAPR Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR2013), pp. 496-500.

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金 (基盤 A, No.23240024) による.