

光線強度の非負制約を用いた L_1 ノルム最小化による 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)}

概要：陰影情報から物体形状や反射特性の推定を行うためには、光源環境の情報が必要不可欠である。中でも光源が物体に比較的近い位置に存在する場合には、放射強度の非等方性や光源の大きさの影響を無視することができず、光源環境を4次元のライトフィールドとしてモデル化する必要がある。そこで本研究では、光源環境を4次元のライトフィールドとしてモデル化し、そのパラメータを少数の画像から推定するインバースレンダリングに基づく手法を提案する。提案手法は、光線強度に関する物理的な性質を凸関数として表現することで、従来のインバースレンダリングに基づく手法に比べ安定かつより高精度なライトフィールドの推定が可能である。提案手法の有効性を示すために、実環境下においてライトフィールドの再構成実験を行い、獲得された画像とリライティングされた画像を用いて定量評価を行った。

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。光源環境を表現するために、様々な光源モデルが提案されてきた。図1に示すように、これら光源モデルは、光源の空間方向の次元数と角度方向の次元数によって4つに大別することができる。従来、CGやCVの分野では、光源が無遠方に存在し光源の大きさは無視できる程小さいという仮定を置くことで、図1(a)に示すような点光源や平行光源などの理想的で扱い易い光源モデルが用いられてきた。また、図1(b)左に示すように、これら理想的な光源の集合を考慮することで空間方向の変化を考慮した大域照明モデルを扱った手法[1]、[2]が提案されている。しかし、実世界の光源は、物体から有限の距離に存在するため、上記光源モデルとは異なる特性を有する。光源が物体から有限の距離に存在することを考慮したモデルとして、図1(b)右に示すような光源を等方な放射輝度を持つ点光源の集合と仮定したモデルや図1(c)に示すような非等方な放射強度を持つ点光源モデルがある。前者を用いた手法は放射輝度の角度方向の変化が

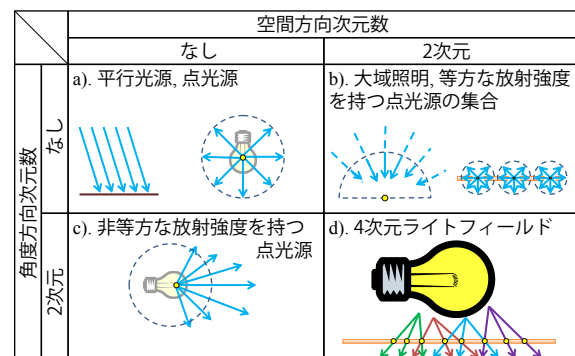


図1 . a) 平行光源, 等方な放射輝度を持つ単一の点光源, b) 大域照明および等方な放射輝度を持つ点光源の集合, c) 非等方な放射輝度を持つ単一の点光源, d) 4D ライトフィールド。

ないものと仮定し、光源の空間方向の広がりを考慮しており、後者を用いた手法は物体の大きさに対して光源が十分に小さいことを仮定し、放射強度の角度方向の変化を考慮している。

しかし、実世界の光源にはレンズやリフレクターが付けられていることが多く、等方な放射輝度を持つ点光源の集合と仮定したモデルでは光源の角度方向の変化を考慮することができない。また、非等方な放射強度を持つ点光源モデルを用いた手法では光源の空間方向の広がりを考慮することができない。そのため、実世界の光源をモデル化するためには、光源の角度方向の変化と空間方向の変化の両方を考慮し、4次元のライトフィールドとしてモデル化する必要がある。既存の4次元ライトフィールドを扱う手法は、カメラを動かすことで各光線強度を直接観測している

¹ 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

a) takahito-a@is.naist.jp

b) tomoka-s@is.naist.jp

c) mukaigawa@is.naist.jp

d) yokoya@is.naist.jp

[3], [4], [5], [6]. 従って, 4 次元のライトフィールドを獲得するためには, 多量の観測を必要とする. 観測にかかるコストを減らすために鏡面球を用いた手法 [7], レンズアレイを用いた手法 [8], フィルターを用いた手法 [9] が提案されてきた. 本研究では従来手法とは異なり, 幾何形状, 反射特性が既知の参照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再構成するインバースライティングに基づく手法を提案する. インバースライティングに基づく手法は不良設定問題になりやすいことが知られており, 従来は参照物体の形状を工夫することで, 陰や影の情報を利用することで性質の良い問題に変換し光源環境を推定していた [10]. それに対し提案手法は, 物理的な制約や事前知識を凸最適化問題として定式化することで, 参照物体の形状が平面という陰や影の情報が使えない状況においても 4 次元のライトフィールドを再構成可能であるという特長がある.

2. 基本的なアイデア

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ライトフィールド平面 $\mathcal{L}$ と呼ぶ. 本研究では図 2 に示すように, 光源から放射された光線が, 透過特性が既知のデフューザを透過し, カメラ上で観測されるものとする. 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. 従って, 観測輝度ベクトルを $o = (o_1, \dots, o_N)^T \in \mathbb{R}^N$, 光線強度ベクトルを $s = (s_1, \dots, s_M)^T \in \mathbb{R}^M$ とすると, o と s の関係は以下のように表すことができる.

$$o = As, \quad (1)$$

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 の数はライトフィールド平面 $\mathcal{L}$ 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ためには, 未知パラメータ数を減らすことが有効である. 本研究では, 未知パラメータ数を減らすために, 微小領域から放射される放射輝度分布を F 次元の球面調和関数を用いて近似する. ライトフィールド平面 $\mathcal{L}$ を L 個の領域に標本化すると, 光線強度ベクトル s と球面調和関数の係数 $c = (c_1, \dots, c_{\hat{H}})^T \in \mathbb{R}^{\hat{H}}$ の関係は以下のように表すことができる.

$$s = Yc, \quad (2)$$

ここで, $Y: \mathbb{R}^{\hat{H}} \mapsto \mathbb{R}^M$ は正規直交基底を満たす球面調和関数の基底行列である. 式 (2) を式 (1) に代入することで,

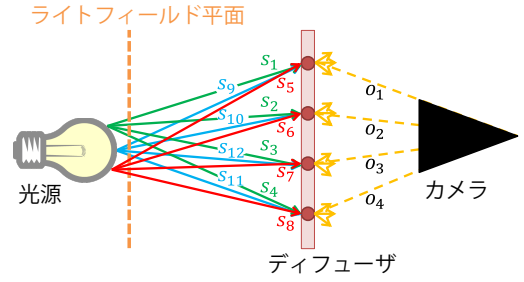


図 2 提案手法のコンセプト. 各観測輝度は透過率を重みとした各光線の重み付き線形和として表現できる.

$$\begin{aligned} o &= AYc \\ &= Bc, \\ b_{i,j} &= \frac{y_{i,j}(\theta, \phi)R(\omega)}{D(u, v, x_i)^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

が得られる. ただし, $b_{i,j}$ は行列 $B \in \mathbb{R}^{\hat{H}} \mapsto \mathbb{R}^N$ の要素, $R(\omega)$ はデフューザの透過特性, ω は 光線とデフューザの法線が成す角, $D(\cdot)$ はライトフィールド平面 $\mathcal{L}$ 上の点 (u, v) とデフューザ上の点 x_i の距離を表す.

3. 観測が不十分な場合における効率的な解法

有効な観測が十分でない場合, 式 (3) の解は観測ノイズやデフューザと光源の位置姿勢推定誤差に敏感になる. そのため, 単純に解を求めると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る. そこで, 本研究では, (a) 光線強度に対する物理的な制約と (b) 球面調和関数の係数に対する L_1 ノルム正則化を用いた 4 次元ライトフィールドの再構成手法を行う. 提案手法は凸最適化として定義されるため, 唯一の解のみを持つ. 以下では, まず凸最適化問題としてどのように定式化できるのかを述べ, 次にそれぞれの制約の性質の特徴を述べる.

3.1 ライトフィールド再構成問題の定式化

本研究では, ライトフィールドの再構成問題を以下のように定式化する.

$$\min_c \|o - Bc\|_2^2 + \iota_Y(Yc) + \lambda \|c\|_1, \quad (4)$$

ここで, 第 1 項は観測された輝度値とレンダリングされた輝度値がの二乗誤差を表している. 第 2 項は光線強度に対する物理的な制約を表し, $\iota_Y(\cdot)$ は指示関数である. また, 第 3 項は球面調和関数の係数の L_1 ノルムを表し, λ は L_1 ノルムの重みを表している. 式 (4) は各項全てが凸関数として表現されているため, その解は唯一の解を持つ. 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.

3.2 光線の非負制約に基づく光線強度に対する物理的な制約

光線強度は非負値でなければならない. この制約は以下のように表現することができる.

$$s \geq 0 \quad (5)$$

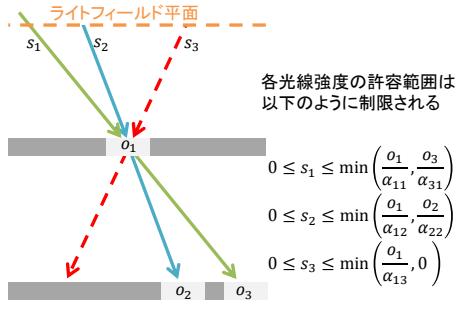


図 3 指示関数による光線強度の許容範囲の制限. 図中の灰色領域は輝度値が 0 の領域.

図 3 に示すように, ディフューザ上の x_i で観測される観測輝度 o_i は, 透過率を重みとした複数の光線強度 $s_j (j \in W, W$ は x_i に入射する光線の集合) の重み付き和で表現されるため, 光線強度 s_j が非負値であるならば, 光線強度 s_j は観測輝度 o_i 以下の値となる. この制約は以下のように表現できる.

$$s_j \leq \frac{o_i}{\alpha_{j,i}} \quad (6)$$

ここで, $\alpha_{j,i}$ は光線 j がディフューザ上の点 x_i に入射する際の透過率である. 図 3 に示すように, 光源の位置関係を変化させることにより, 各光線 s_j は異なるディフューザ上の点に入射する.

そのため, 各光線強度 o_i の上界は以下のように表現できる.

$$0 \leq s_j \leq \min_{i \in \mathcal{X}_j} \left(\frac{o_i}{\alpha_{j,i}} \right) \quad (7)$$

ここで $\mathcal{X}_j$ は光線 j が通過したディフューザ上の点 x_i のインデックス i に対応する集合である. 式 (7) より, 光線強度ベクトル s の存在する範囲は, 閉凸集合 $\mathcal{V}$ を用いて $s \in \mathcal{V}$ と表現できる. 提案手法は球面調和関数を用いて光線強度を近似しているが, 球面調和関数は正規直交基底であるので s が写像された c も閉凸集合となる. そのため上記制約は以下のように表現できる.

$$Yc \in \mathcal{V} \quad (8)$$

この制約は指示関数 $\iota_{\mathcal{V}}(\cdot)$ を用いて凸関数として表現可能である. すなわち, 式 (4) で用いる指示関数 $\iota_{\mathcal{V}}(Yc)$ はレンダリングされたすべての光線 s_j が上記制約を満たしている場合は 0, そうでない場合は ∞ の値を取る関数である.

3.3 L_1 ノルム正則化項

ある信号を基底と係数の積で表現する場合において, 過適合を避けるために重要な基底を選択する L_1 ノルム正則化が一般的に行われている. そこで本研究では, c の絶対和を正則化項として用いる. なお L_1 ノルム正則化項の重みパラメータ λ は重要な基底をどれだけ選択するのかを決定するパラメータであり, 経験的に決められる事が多い.

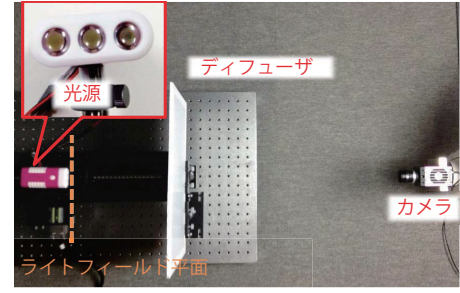


図 4 計測システム.

4. 実験

提案手法の有効性を示すために, 図 4 に示すような実環境において獲得された画像を用いて光源の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よりライティングされた画像と撮影された画像とを比較することでライトフィールドの推定精度を検証した. 本実験では, 光源として LED が直線上に 3 つ並んでいるものを用い, ディフューザに対し光源を正対した状態で設置し, ディフューザと光源との距離を 0mm から 300mm まで 1mm 間隔で変化させながら解像度 257×364 の画像を撮影した (図 5). 入力画像として, 撮影された画像の内の 4 枚 (距離 60mm, 90mm, 120mm, 150mm) を用いた. また, ディフューザの透過特性としてランバート拡散透過を用いた. なお, 本実験では議論の簡単化のために, ライトフィールド平面 $\mathcal{L}$ の位置をディフューザと光源との距離が 0mm の時のディフューザの位置とし, ライトフィールドの空間方向の標本化位置としてディフューザ上で分かれて観測される各光源のハイライト領域の重心位置 3 点を与えている. このような条件下で以下の六つの手法を比較した.

- (I) 二つの制約を用いたライトフィールド再構成 (提案手法: 最小二乗 + 指示関数 + L_1 ノルム正則化),
- (II) 光線強度の物理的な制約 (a) を用いないライトフィールド再構成 (最小二乗 + L_1 ノルム正則化),
- (III) L_1 ノルム正則化 (b) を用いないライトフィールド再構成 (最小二乗 + 指示関数),
- (IV) 二つの制約条件 (a), (b) を用いないライトフィールド再構成 (最小二乗),
- (V) 光源を非等方な放射輝度を持つ単一の点光源と仮定した手法 (最小二乗),
- (VI) 光源を等方な放射輝度を持つ点光源の集合と仮定した手法 (最小二乗).

ただし, 手法 (I)-(IV) は, 手法 (I) から制約条件 (a), (b) をそれぞれ取り除いたものである. また手法 (I)-(V) は各標本化位置に対して 265 個の球面調和関数の係数を与えた. 手法 (V) においては, 与えられた 3 点の標本化位置の真ん中を点光源の位置と定めた. 加えて手法 (VI) においては, ライトフィールドの空間解像度としてライトフィールド平面 $\mathcal{L}$ を 257×364 に標本化したものを用いた. 図 5 に撮影画像と上記六つの手法で復元されたライトフィールドを用

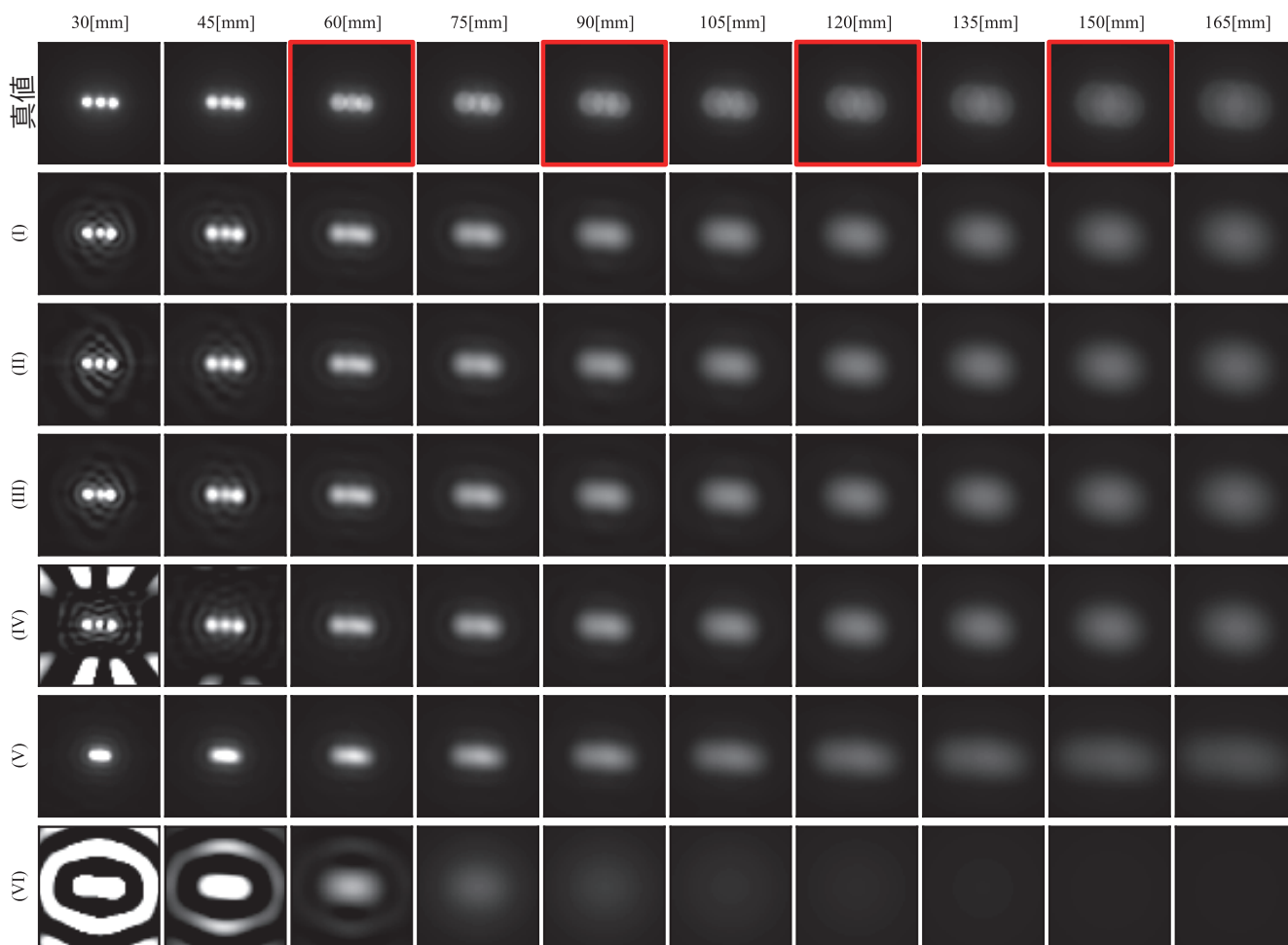


図 5 撮影画像 (真値) と各手法によって推定されたライトフィールドを用いてリライティングした画像. (I) 二つの制約を用いたライトフィールド再構成 (提案手法), (II) 光線強度の物理的な制約を用いないライトフィールド再構成, (III) L_1 ノルム正則化を行わないライトフィールド再構成, (IV) 二つの制約条件を用いないライトフィールド再構成, (V) 光源を非等方な放射輝度を持つ単一の点光源と仮定した手法, (VI) 光源を等方な放射輝度を持つ点光源の集合と仮定した手法. 図中赤枠で囲まれた画像は推定に用いた 4 枚の入力画像を表す.

いてリライティングした結果を, 図 6 にディフューザと光源の距離に応じた各手法のリライティング画像と真値との輝度誤差分布を, 図 7 に推定されたライトフィールドマップを, それぞれ示す.

図 5 の撮影画像より, 光源とディフューザの距離を変えて撮影した際, 三つの光源からの投影像が重なることで, 距離に応じて模様に変化していることから分かる. このことからこの光源のライトフィールドは空間方向と角度方向双方に応じて変化することが確認できる. これに対して, 手法 (V) は距離に応じた模様の変化に対応することができず, リライティングした結果においてその細部が失われている. 手法 (VI) は角度方向に応じた模様の変化に対応することができず, リライティングした結果は撮影画像と大きく異なっている. 一方, 手法 (IV) を除く 4 次元のライトフィールド持った手法 (I)-(III) は, すべての領域において同程度の良好なリライティング結果が得られている. このことから実世界の光源のモデル化には 4 次元のライトフィールド

が必要であることがわかる.

制約条件を用いない手法 (IV) においては, 図 6 に示すように, 入力画像撮影位置においては最も良いリライティング結果となっているものの, その他の位置においては他の手法 (I)-(III) と比べ極端に悪いリライティング結果となっている. これは, 図 7 に示すように, 手法 (IV) のみが推定されたライトフィールドが正負ともに大きな値を持つことで, 入力画像に対し過適合しているためであると考えられる. 一方, 図 6 から確認できるように, 手法 (I)-(III) はその三つが同程度の良好なリライティング結果となっている. これは, 手法 (II) の L_1 ノルム正則化による球面調和関数の重要な基底を抽出する効果と $\alpha p z$ 手法 (III) の物理的な制約が共に有効な制約であることを示している. しかし, 図 7 から確認できるように, 手法 (II) は負の放射強度を持っている. 光源とディフューザの距離が近い場合において, 手法 (I), (III) より誤差が大きくなっている. 一方, 手法 (III) は 40mm 以下の距離において提案手法 (I) 以上

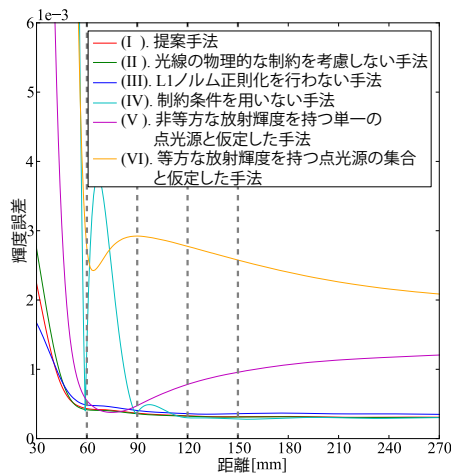


図 6 リライティング画像と真値との輝度誤差分布.

に推定誤差が小さいが、今回の実験に用いた光源が単純なライトフィールドを持ち、球面調和関数の次数と標準化位置が必要な分しか与えていないためであると考えられる。そのため今後は、より複雑なライトフィールドを持つ光源、球面調和関数の次数や標準化位置についても検証する必要がある。

5. まとめ

本稿では、光源を動かした際に生じるディフューザ上の陰影変化から光源の 4 次元ライトフィールドを再構成する手法を提案した。実験で示したように、提案手法は従来手法と異なり多量の観測を必要とせず、少数の入力画像から 4 次元のライトフィールドを再構成可能であるという特長を持つ。提案手法はディフューザ上で観測される観測輝度を光線強度に分解する。また、このライトフィールド再構成を凸最適化問題として定式化しているため、提案手法は唯一の解を持つ。今後の課題として、空間方向の解像度、時間方向の解像度ともどの程度必要なのかを検討する必要がある。

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。

参考文献

- [1] Verbeck, C. and Greenberg, D.: A comprehensive light source description for computer graphics, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 4, No. 7, pp. 66–75 (1984).
- [2] Debevec, P. and Malik, J.: Recovering high dynamic range radiance maps from photo graphs, *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp. 369–378 (2008).
- [3] Ashdown, I.: Near-Field Photometry: A New Approach, *Journal of the Illuminating Society*, Vol. 22, No. 1, pp. 163–180 (1993).
- [4] Seigel, M. W. and Stock, R. D.: A General Near-Zone Light Source Model and its Application to Computer Automated Reflector Design, *SPIE Optical Engineering*, Vol. 35, No. 9, pp. 2661–2679 (1996).
- [5] Rykowski, R. F. and Wooley, C.: Source Modeling for Illumination Design, *In Lens Design, Illumination, and Optomechanical Modeling*, SPIE, Vol. 3130, pp. 204–208 (1997).

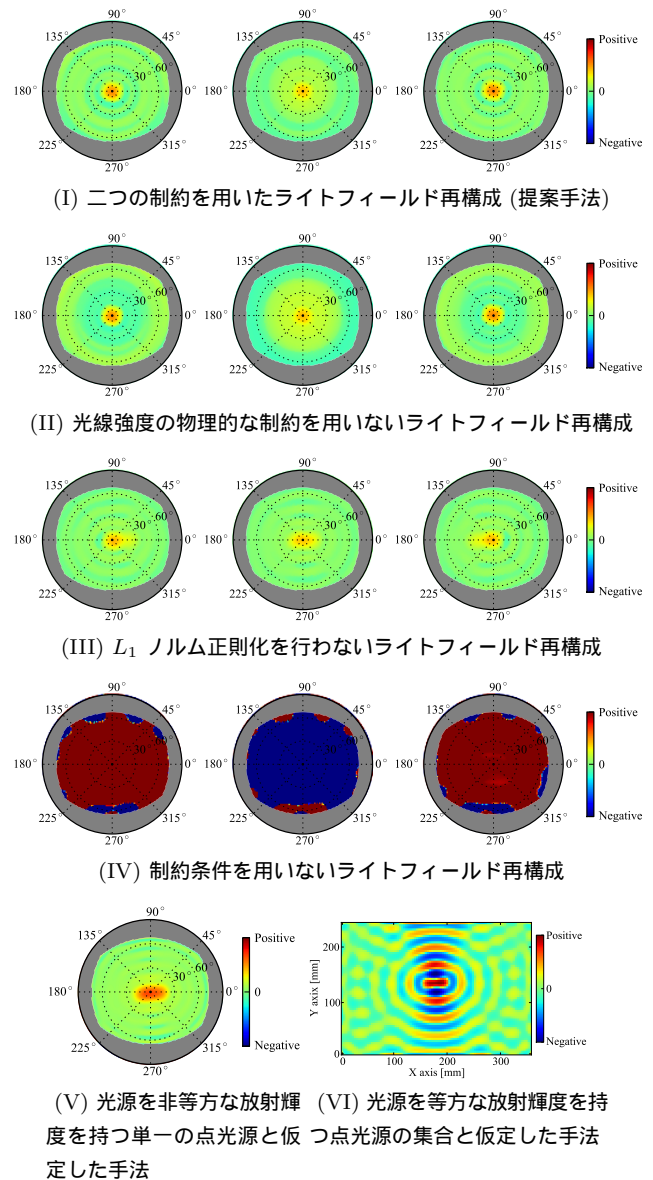


図 7 出力されたライトフィールドマップ。図中灰色領域は一度も観測がなかった領域を表している。

- [6] Jenkins, D. R. and Monch, H.: Source Imaging Goniometer Method of Light Source Characterization for Accurate Projection System Design, *Proc. of SID Conf.*, No. 862–865 (2000).
- [7] Unger, J., Wenger, A., Hawkins, T., Gardner, A. and Debevec, P.: Capturing and rendering with incident light fields, *Proc. Eurographics symposium on rendering*, pp. 141–149 (2003).
- [8] Cossairt, O., Nayar, S. K. and Ramamoorthi, R.: Light Field Transfer: Global Illumination Between Real and Synthetic Objects, *ACM Trans. on Graphics*, Vol. 27, No. 3, pp. 57:1–57:6 (2008).
- [9] Goesele, M., Granier, X., Heidrich, W. and Seidel, H.-P.: Accurate lightsource acquisition and rendering, *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp. 621–630 (2003).
- [10] Takai, T., Nimura, S., Maki, A. and Matsuyama, T.: Self shadows and cast shadows in estimating illumination distribution, *Proc. European Conf. on Visual Media Production*, pp. 1–10 (2007).