

アクティブライティングによる相互反射の解析

松下 康之, Steven M. Seitz, Kiriakos N. Kutulakos

Microsoft Research Asia, University of Washington, University of Toronto

あらまし 相互反射の解析は, さまざまなコンピュータビジョンのアルゴリズムにとって重要な問題の一つである. 筆者らはアクティブライティングを用いた相互反射の解析手法を提案し, この中で未知の形状と反射特性を持つ任意のシーンを撮影した画像中から n 回反射成分を分離することを可能にするための線形なオペレータを導くことができることを示した [1]. この手法を用いることにより, 画像中において相互反射成分を除去することも可能となる. 本稿ではその手法を紹介し, 実験による検証結果も示す.

Analyzing Interreflections by Active Lighting

Yasuyuki Matsushita, Steven M. Seitz, Kiriakos N. Kutulakos

Microsoft Research Asia, University of Washington, University of Toronto

Abstract Analyzing interreflections is one of the most important topics for many computer vision algorithms. The authors have proposed a method for analyzing interreflections using active lighting [1]. In the work, we have proved the existence of a set of linear *interreflections cancellation operators* that enable computing each n -bounce image, in which the contribution of light that bounces exactly n times before reaching the camera is recorded. In this paper, we introduce the theory and show the experimental result.

1 はじめに

物体間における光の相互反射は, 光源から放出された光が物体表面において複雑に反射を繰り返す物理現象を指す. シーン内において相互反射を経た後に, 光線の一部は最終的にカメラによって撮影される. この撮影される画像 I は, シーン内で一回だけ反射した光線の集合 (一回反射成分) I^1 , 二回反射した成分 I^2 , ..., n 回反射成分 I^n の線形和によって構成される (図 1).

$$I = I^1 + I^2 + I^3 + \dots + I^n + \dots$$

コンピュータビジョンの多くの手法において, $I \approx I^1$ という近似がなされるが, より正確に実世界の現象を記述, 解析するためには相互反射成分を無視することはできない. 現実にも多くの場合において, 相互反射の影響は無視できないほどに大きくなる. 図 2 に, 相互反射の有無によるシーンの見えの違いをシミュレートした図を示す.

1.1 関連研究

相互反射を含むライトトランスポート (light transport) のシミュレーションは, コンピュータグラフィックスの分野においてはレイ・トレーシング法 [2, 3], ラジオシティ法 [2, 4] などにおいてよく知られている. コンピュータビジョンにおいても Horn や Koenderink

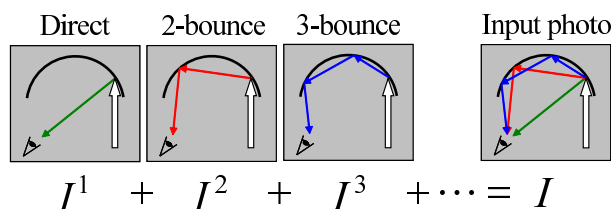
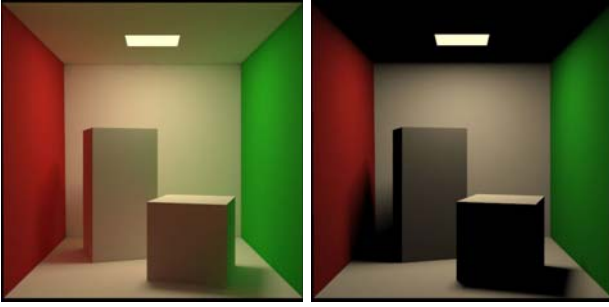


図. 1: シーンへ入射した光は, 一回反射 I^1 , 二回反射 I^2 , 三回反射 I^3 ... n 回反射 I^n を経て, その線形和としてカメラによって撮影される.

ら [5, 6] によって研究されてきた. このように順方向の相互反射のシミュレーションに関しては比較的多くの研究がなされてきたが, その逆問題である相互反射の解析 (相互反射成分の推定および除去) についてはあまり研究されていない.

近年, 画像ベースのレンダリング技術 (image-based rendering) への高い注目もあり, 多くの画像を異なる光源下で撮影することで順方向のライトトランスポート関数を獲得するアプローチが, 多くの研究者により提案されている [7, 8, 9]. これらの手法は, 相互反射・影・内部反射などの非局所的な光の影響も暗に含むことが可能である. Yu ら [10] や, Machida ら [11] は, シーンの形状と光源分布が既知の場合において, シーンを撮



(a) 相互反射あり (b) 相互反射なし

図. 2: 相互反射の有無による見えの違い.

影した画像から拡散相互反射成分と物体表面の反射パラメータを推定する手法を提案している. しかしながら上述のどの手法も, シーンの形状や光源分布が未知の場合における相互反射の計測や解析に用いることはできない.

本稿で述べる相互反射の解析手法は相互反射の除去を目的としたものであるが, 相互反射から形状を推定する手法 (shape-from-interreflections) とも関連している. これらの中には, 拡散面を仮定した形状推定手法 [12, 13], 相互反射による色の混合 [14, 15, 16, 17] などが含まれる. 本手法にもっとも近いものとして, Nayar らによる相互反射を考慮した繰り返し計算を用いたフォトメトリックステレオ [12] が挙げられる. これに対する本手法の主な利点は, 1) 光源に関する仮定を置かない (Nayar ら [12] は光源分布が均一であるという仮定を置いた), 2) 本手法は相互反射除去オペレータを Closed-form で導く, の二点である. これに対して本手法のデメリットは, Nayar らの手法 [12] に対して多くの入力画像を必要とする点である.

1.2 本稿の概要

本稿では, シーンの形状・反射特性・光源分布が任意でかつ未知である場合において, 画像ベースで相互反射を解析する手法について述べる. その結果として, 未知の光源分布下で, 任意の形状・反射特性を持つシーンを撮影した画像から相互反射成分を除去するための線形なオペレータを計算できることを示す. また, 実際にそのような相互反射除去オペレータを獲得するために, アクティブライティングを用いる手法を紹介する. 今回はシーン上の複数の点にレーザーを入射しその時のシーンの見えを撮影するが, これをプロジェクタに置き換えることも考えられる. まず, このようにして得られた画像列から相互反射除去オペレータを計算できることを示す. さらに相互反射除去オペレータを用いて, 未知の光源下で撮影された画像から, 一回反射成分, 二回反射成分, ... n 回反射成分の計算が可能であることを理論的・実験的に示す.

2 相互反射

シーンから放出される光線を $\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}}$ とすると, シーンの見えはその関数である**放出光分布** (もしくは **Outgoing light field**) $L_{out}(\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}})$ として記述することができる [18, 19, 20]. 本稿では, 放出光 $\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}}$ をその始点 \mathbf{x} と, 始点から終点 \mathbf{y} への方向ベクトルとして記述し, \mathbf{x} は必ずシーン上の点であるとする. 同様に, シーンへの**入射光分布** (Incoming light field) $L_{in}(\omega_{\mathbf{x}'}^{\mathbf{x}})$ も, 光線の始点 \mathbf{x}' からシーン上の到達点 \mathbf{x} として記述する.

目に見えるシーンは放出光分布 L_{out} の一部であり, この放出光は, 光源からシーンへ入射した光がシーン中の物体に反射することによって生じる. シーンへの入射光の一部は物体表面において一回だけ反射し, その後直接目に入る. また, 別の一部の入射光は物体間で複数回の反射を繰り返し, その一部が目に入る. したがって, 目に見えるシーンは**直接反射成分**と**相互反射成分**の和として記述することができる.

$$L_{out}(\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}}) = L_{out}^1(\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}}) + L_{out}^{2,3,\dots}(\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}}). \quad (1)$$

視点が固定されている場合には, 直接反射成分 $L_{out}^1(\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}})$ はシーン上の点 \mathbf{x} の双方向反射率分布関数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function: 以下 BRDF と略す) と, 光源から \mathbf{x} へ直接入射する光によって決定される. また, 相互反射成分 $L_{out}^{2,3,\dots}(\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}})$ は, シーン上の点 \mathbf{x} へそれ以外のシーン上の点からの反射によって入射する光の分布によって決定される. 式 (1) は, コンピュータグラフィックスでよく知られている, 光輸送方程式 (light transport equation) もしくはレンダリング方程式 (rendering equation) [21, 4] によっても以下のように同様に記述することができる.

$$L_{out}(\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}}) = L_{out}^1(\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}}) + \int_{\mathbf{x}'} A(\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}}, \omega_{\mathbf{x}'}^{\mathbf{x}}) L_{out}(\omega_{\mathbf{x}'}^{\mathbf{x}}) d\mathbf{x}'. \quad (2)$$

上述の式 (2) において, 関数 $A(\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}}, \omega_{\mathbf{x}'}^{\mathbf{x}})$ は, 光線の始点 \mathbf{x}' からシーン上の点 \mathbf{x} へ入射した光が反射によって終点 \mathbf{y} へ届くときのエネルギー効率を示す. したがって, 関数 $A(\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}}, \omega_{\mathbf{x}'}^{\mathbf{x}})$ は BRDF, \mathbf{x} と \mathbf{x}' 間の可視性 (あるいは遮蔽性), そして光の減衰の影響を含む関数である [21, 4]. ただし, $\mathbf{x} = \mathbf{x}'$ の場合には $A(\omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{y}}, \omega_{\mathbf{x}}^{\mathbf{x}})$ は 0 であるとする.

シーンが小さな面の集合で表現できるとすると, 光の分布を量子化することで式 (2) を以下のように離散表現することができる [4, 12].

$$\mathbf{L}_{out}[i] = \mathbf{L}_{out}^1[i] + \sum_j \mathbf{A}[i, j] \mathbf{L}_{out}[j]. \quad (3)$$

ここで, \mathbf{L}_{out} は離散化された放出光分布, \mathbf{L}_{out}^1 は放出光の直接反射成分である. また, $\mathbf{A}[i, i] = 0$ である. 式 (3) を行列式で表すと,

$$\mathbf{L}_{out} = \mathbf{L}_{out}^1 + \mathbf{A} \mathbf{L}_{out}, \quad (4)$$

と記述することができる。式 (4) は離散化された形式で、光がどのようにシーン中を伝播するかを表している。 \mathbf{L}_{out} に関して式 (4) を解くと [21, 4],

$$\mathbf{L}_{out} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{L}_{out}^1, \quad (5)$$

となる。この式は、オペレータ $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ によって放出光の直接反射成分 \mathbf{L}_{out}^1 が、直接反射と相互反射を含む放出光分布 \mathbf{L}_{out} に写像できることを示している。

2.1 相互反射の除去

ところで、以下のようなオペレータを考えてみる。

$$\mathbf{C}^1 \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{I} - \mathbf{A}. \quad (6)$$

オペレータ \mathbf{C}^1 と式 (5) から、以下の式が定義される。

$$\mathbf{L}_{out}^1 = \mathbf{C}^1 \mathbf{L}_{out}. \quad (7)$$

式 (7) は、オペレータ \mathbf{C}^1 を放出光分布 \mathbf{L}_{out} に乗算することによって、相互反射成分を除去できることを示している。本稿では、このオペレータ \mathbf{C}^1 を**相互反射除去オペレータ**と呼ぶ。この結果はレンダリング方程式からの導出であり、従って、 \mathbf{C}^1 は任意の BRDF について存在し、そして線形である。過去の研究においては、Forward light transport のケースのみにおいて類似の議論がなされたが [21, 4, 12], 本稿で述べる除去オペレータに関しては研究がなされていなかった。

式 (7) は、相互反射除去オペレータの存在を示すものであるが、 \mathbf{C}^1 は \mathbf{A} から導出されているため、形状と反射特性に関して定義されており、これらが未知の場合にはそのまま使うことができない。この制約を取り除くために、以下で画像ベースの解釈を考える。

2.2 画像ベースの相互反射除去オペレータ

シーン内に**単位入射光** i を入力することを考えよう。このような単位入射光は、レーザー光線やプロジェクタによって実現することができる。単位入射光を入力した場合の、シーンからカメラに向かう放出光分布を \mathbf{t}_i とすると、撮影される放出光分布は単位入射光 i に対する**インパルス応答**と考えることができる。本稿では、 \mathbf{t}_i を**インパルス拡散関数** (Impulse scattering function: 以下 ISF) と呼ぶ¹。シーン上の量子化された各点に対して、単位入射光を入力し、ISF $\mathbf{t}_1 \dots \mathbf{t}_m$ を撮影することを考える。このようにして得られるの ISF \mathbf{t}_i を並べることによって以下のような ISF 行列 \mathbf{T} を作るができる。

$$\mathbf{T} \stackrel{\text{def}}{=} [\mathbf{t}_1 \ \mathbf{t}_2 \ \dots \ \mathbf{t}_m]. \quad (8)$$

このような ISF 行列 \mathbf{T} を測定することは理論的には可能であるが、すべての ISF セットを撮影することは現

¹インパルス拡散関数は、[8] において impulse response とも呼ばれている。

際にはコストの点で非常に困難である。過去の研究において、ISF 行列 \mathbf{T} を二次元に簡略化して ISF 行列 \mathbf{T} を測定する手法が提案されている [7, 8, 9]。ISF 行列 \mathbf{T} は、あらゆる放出光分布の基底であり、ISF の線形結合によって任意の放出光分布 \mathbf{L}_{out} を記述することができる。Debevec ら [7] はこれを利用したリライティングのアプリケーションを提案している。

このような ISF 行列 \mathbf{T} を用いることにより、任意の放出光分布 \mathbf{L}_{out} を入射光分布 \mathbf{L}_{in} の関数として記述することができる。

$$\mathbf{L}_{out} = \mathbf{T} \mathbf{L}_{in}. \quad (9)$$

ISF \mathbf{t}_i に対して、相互反射除去オペレータ \mathbf{C}^1 を乗算することにより、以下のように ISF \mathbf{t}_i の直接反射成分 \mathbf{t}_i^1 を取り出すことができる。

$$\mathbf{t}_i^1 \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{C}^1 \mathbf{t}_i. \quad (10)$$

ISF 行列 \mathbf{T} の各列に対して同様の演算をすることにより

$$\mathbf{T}^1 = \mathbf{C}^1 \mathbf{T}, \quad (11)$$

を得ることができる。ここで、 $\mathbf{T}^1 = [\mathbf{t}_1^1 \ \mathbf{t}_2^1 \ \dots \ \mathbf{t}_m^1]$ とする。上式から、以下のように相互反射除去オペレータ \mathbf{C}^1 が導出される。

$$\mathbf{C}^1 = \mathbf{T}^1 \mathbf{T}^{-1}. \quad (12)$$

式 (12) は、式 (6) とは異なり画像ベースで定義される。従って、このアプローチではシーンの形状や反射特性に関する前知識を必要としない。この相互反射除去オペレータを放出光分布 \mathbf{L}_{out} に対して適用するという操作は、形式的には、まず入射光分布 \mathbf{L}_{in} を求め ($\mathbf{L}_{in} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{L}_{out}$)、この \mathbf{L}_{in} を用いてシーンを直接反射のみを考慮してレンダリングすること ($\mathbf{L}_{out}^1 = \mathbf{T}^1 \mathbf{L}_{in}$) に相当する。

2.3 n 回反射成分の計算

さて、相互反射の二回反射成分のみを計算したいとしよう。二回反射とは、光源から出た光がシーン上の点 \mathbf{p} にあたり、そこから反射した光が別のシーン上の点 \mathbf{q} に到達し、さらにそこで反射した光がカメラに入るケースを指す (図 1 の I^2 を参照)。このような二回反射成分のみから構成される画像を計算することができるだろうか。この問題は、シーンの形状・BRDF・光源が既知である場合には簡単に解が求まることが知られている [2]。しかしながら、形状・光源が共に未知な場合にはこれは非常に困難な問題となる。本稿では、相互反射を除去するのみでなく、二回反射、三回反射、..., n 回反射成分のみから構成される画像を計算する手法についても考察する。

シーンからの放出光分布 \mathbf{L}_{out} が与えられたとき、相互反射のみの成分は $\mathbf{L}_{out} - \mathbf{C}^1 \mathbf{L}_{out}$ と記述できる。これは、シーンの放出光分布 \mathbf{L}_{out} から、直接反射成分 $\mathbf{C}^1 \mathbf{L}_{out}$ を差し引いたものに相当する。相互反射成分のみを考慮した場合に、シーン上の点 \mathbf{p} に入射する光は、シーン上の別の点から \mathbf{p} に向かう直接光であると考えることができる。したがって、相互反射成分 $\mathbf{L}_{out} - \mathbf{C}^1 \mathbf{L}_{out}$ に対して、相互反射除去オペレータを掛けることにより $(\mathbf{C}^1(\mathbf{L}_{out} - \mathbf{C}^1 \mathbf{L}_{out}))$ 、二回反射成分のみを取り出すことができる。このようにして、 n 回反射成分 \mathbf{L}_{out}^n と、それを取り出すためのオペレータ \mathbf{C}^n は以下のように定義することができる。

$$\mathbf{C}^n \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{C}^1 (\mathbf{I} - \mathbf{C}^1)^{n-1}, \quad (13)$$

$$\mathbf{L}_{out}^n \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{C}^n \mathbf{L}_{out}. \quad (14)$$

ここで、カメラ視点から見ると、 n 回反射成分 \mathbf{L}_{out}^n はシーン内で n 回反射を経てカメラに入る光を指す。したがって、実際のカメラからの見えは以下のように各回反射の和として記述することができる。

$$\mathbf{L}_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{L}_{out}^n. \quad (15)$$

3 拡散反射面の場合

前述の結果は、BRDF やカメラの視点に関して何の制約も持たないが、これは相互反射除去オペレータ \mathbf{C}^i が存在するというを示したのみであって、任意のシーンに関してこのようなオペレータを計算することは多くの場合において困難である。本節では、実際にこれを計算することを考える。その結果として、シーンが拡散反射面で構成されている場合において、固定視点から撮影したインパルス画像列から相互反射除去オペレータ \mathbf{C}^i を計算できることを示す。

拡散反射 (Lambertian reflection) 面とは、全方位に向かって同じ量の光を反射する面を指す。したがって、このようなシーンにおいては、シーン上の各点において四次元で定義される放出光分布は二次元の関数に縮退する。また拡散反射面では、どのような角度から光が入射してもいつも全方位に均一な強さの光を反射するという特性を持つ。したがって、シーン上への各点への入射光分布 \mathbf{L}_{in} も二次元の関数として記述することができる。

上述のとおり、拡散反射面で構成されるシーンにおいては、入射光分布と放出光分布が共に二次元の関数として記述できるので、シーン上の各点に細いレーザーを入射し、これを固定視点から撮影することによって ISF 行列 \mathbf{T} を得ることができる。現実には、画像上の各ピクセルに対応するシーン上の点すべてにレーザーを入射することは困難であるので、適当な間隔を置い

たシーン上の離散的な点に対してレーザーを入射することになる。このようにして、 m 個のシーン上の点に対してレーザーを順番に入射し、 m 回の撮影をすることにより ISF 行列 \mathbf{T} を得る。ISF 行列 \mathbf{T} の各列 \mathbf{t}_i は、シーン上の i 番目の点にレーザーを入射したときに撮影された画像をベクトル化したものに対応する。ここで、各列ベクトルは大きさ 1 に正規化されているものとする。

このような拡散面シーンにおける ISF 行列 \mathbf{T} から、相互反射除去オペレータを導出することができる。**拡散反射シーンにおける相互反射除去オペレータの導出:** 固定視点から拡散反射シーンを撮影する場合に、一意な $m \times m$ の相互反射除去オペレータ \mathbf{C}^1 が以下のように定義される。

$$\mathbf{C}^1 = \mathbf{T}^1 \mathbf{T}^{-1}. \quad (16)$$

式 (16) で、 \mathbf{T}^1 は $m \times m$ の対角行列であり、その要素は \mathbf{T}^{-1} の対角成分の逆数である。このオペレータ \mathbf{C}^1 は、前述と同様に、放出光分布から相互反射成分を除去するオペレータであり、シーンの形状、光源分布に関する仮定、また知識を必要としない。

証明: 式 (6) と式 (12) から、

$$\mathbf{C}^1 = \mathbf{T}^1 \mathbf{T}^{-1},$$

において、 $\mathbf{C}^1[i, i] = 1$ であり、 $\mathbf{C}^1[i, j] = -\mathbf{A}[i, j]$ である。ISF 行列 \mathbf{T} の各列 \mathbf{t}_i には、ひとつの点 \mathbf{p}_i のみが直接光によって照らされており、この点は \mathbf{t}_i の i 番目のピクセルに対応する。したがって、 \mathbf{T}^1 は対角行列である。 \mathbf{T}^1 が対角行列であり、 \mathbf{C}^1 の対角成分はすべて 1 であることから、以下の式が成り立つ。

$$\mathbf{T}^1[i, i] = \frac{1}{\mathbf{T}^{-1}[i, i]}.$$

QED

このように、相互反射除去オペレータ \mathbf{C}^1 を閉形式で得ることができる。この相互反射オペレータ \mathbf{C}^1 は、シーン上の点の反射率やオクルージョンに関する情報を含んでいる。さらに、Nayar ら [12] の結果から、以下の式を得ることができる。

$$\mathbf{C}^1 = \mathbf{I} - \mathbf{PK}. \quad (17)$$

ここで \mathbf{P} は対角行列であり、 $\mathbf{P}[i, i]$ は点 i のアルビドを π で割った値、そして \mathbf{K} は *diffuse form factors* の行列である [22]。さらに式 (17) は、本手法がシーンテクスチャに依存しないことを示している。

4 実験結果

前節までの理論を確認するために、シミュレーションと実測データの両方を用いて実験をおこなった。こ

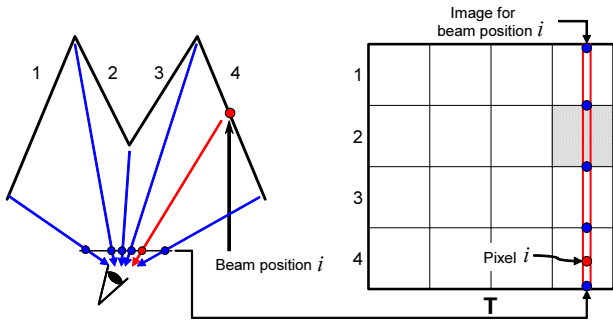


図. 3: “M” シーンと, ISF 行列 \mathbf{T} の図. シーン上の i 番めの点にレーザーを入射したときに撮影した画像は, ベクトル化, 正規化されて, ISF 行列 \mathbf{T} の i 列めに格納される. 直接光を受けるシーン上の点に対応するピクセルは, ISF 行列 \mathbf{T} の対角成分 $\mathbf{T}[i, i]$ に対応する. この “M” シーンは四つの面で構成されているので, ISF 行列 \mathbf{T} は, $4^2 = 16$ のチェッカーボードのようなブロックを持つ.

の実験の目的は, 相互反射除去オペレータを計算できることを示すこと, n 回反射画像を計算できることを示すこと, そしてシミュレーションと実世界データでの結果を比較することにある.

実験のために用いた器具は, Canon EOS-20D カメラ, 50mW の緑色レーザー, レーザーの方向を制御するための PC 制御のパンチルトユニットである. レーザーのスペックル (speckle) の影響を抑えるために, 大口径の明るいレンズ (F1.2, f85mm, 単焦点) を用いた. 非常に明るい一回反射成分と, それに比して非常に暗い相互反射成分の両方を撮影するため (実験シーンのダイナミックレンジは 145dB であった) に, アパーチャ F1.2 で 1/15s から 1/8000s の広範囲にわたるシャッタースピードで撮影した画像と, さらにアパーチャ F16 と 1/8000s で撮影した画像を用いてハイダイナミックレンジ画像を合成した. 合成時には Mitsunaga ら [23] の光学的キャリブレーションにより画像の線形化をおこなった. また, 本実験では Raw CCD データから緑チャンネルの値のみを取り出して実験をおこなった.

シーンの ISF 行列 \mathbf{T} を獲得するために, 本実験ではレーザー光線をシーン内の m 個の点へ向かって順番にうちこみ, 各々のレーザー位置についてシーンのハイダイナミックレンジ画像を撮影した. 本手法では, ISF 行列 \mathbf{T} を測定する際に直接光を受ける点の検出が必要となる. 今回は単純に, もっとも短い露光時間で撮影した画像中のレーザーの点の中心点を直接光を受ける点とした. レーザーの中心点は m 個の画像それぞれについて計算され, これらの点の輝度をサンプリングすることにより $m \times m$ の ISF 行列 \mathbf{T} を得る. 前述したが, ISF 行列 \mathbf{T} の列は m 個の画像それぞれに対応し, 行はこれらのサンプリング点に対応する.

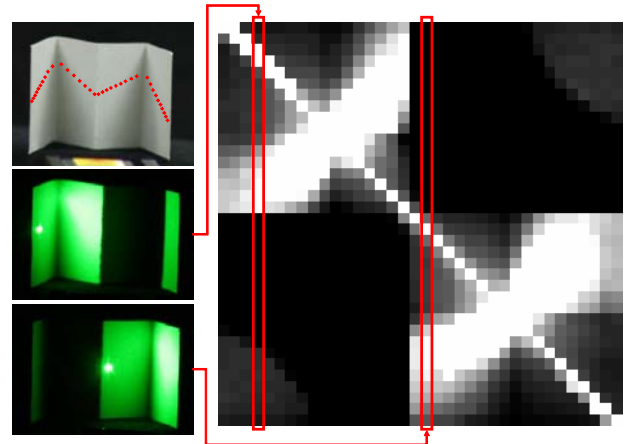


図. 4: 左上: “M” シーン. 赤い点は, レーザーを受ける点 i を示す. 左から右の順序でレーザーによるスキャンをおこなう. 左中: 第 4 番めのレーザー位置に対応するインパルス画像. ISF 行列 \mathbf{T} の第 4 列は, この画像中のピクセル値を左上の画像の赤い点の位置でサンプリングしたものを列ベクトルにしたものに対応する. 左下: 別のレーザー位置に対応するインパルス画像. 右: 測定された ISF 行列 \mathbf{T} .

一次元シーンにおける相互反射の解析

はじめの実験として, 図 3 に示すような, 拡散反射面で構成される “M” シーンを作成しシミュレーションをおこなった. ISF 行列 \mathbf{T} を計算するために, 入射レーザー光が左から右へ移動した場合のシーンの見えを 7 回反射までのレイトレーシングを用いて計算した. それと同時に, 真値を得るために, 個々の n 回反射成分の計算も独立におこなった.

図 5 の中段は, シミュレーションによって得られた ISF 行列 \mathbf{T} を, 直接反射成分, 二～四回反射成分, そしてすべての相互反射成分に分解した結果である. この結果を解釈するために, “M” を構成する面の間でどのように光が伝播するかを考えてみよう. まず, 図 5 の枠で囲った一列に着目し, 面 1 内の一点にレーザーを入射した場合を考えてみる (図 5 上段も参照). このとき, シーン中の一点のみが直接光を受けているので, 相互反射をすべて除去した場合には直接光を受けるシーン上の点に対応する画像中の一画素のみが非ゼロの値を持つはずである. 図 5 中段の $\mathbf{C}^1\mathbf{T}$ を見ると確かに, 一点のみが非ゼロの値を持っていることがわかる. この面 1 への直接光によって, 二回目の相互反射で面 2 と面 4 へのみ光が届く. したがって, 二回反射成分の画像では, 面 2 と面 4 に対応する画素のみで非ゼロの値を持つはずである. 実際に計算された二回反射成分画像 (図 5 中段の $\mathbf{C}^2\mathbf{T}$) を見てみると, 確かにそのようになっていることがわかる. このように, 計算によって得られた結果は予測と一致している. 定量的にも, この分解結果は真値とほぼ一致しており, 自乗誤差は直

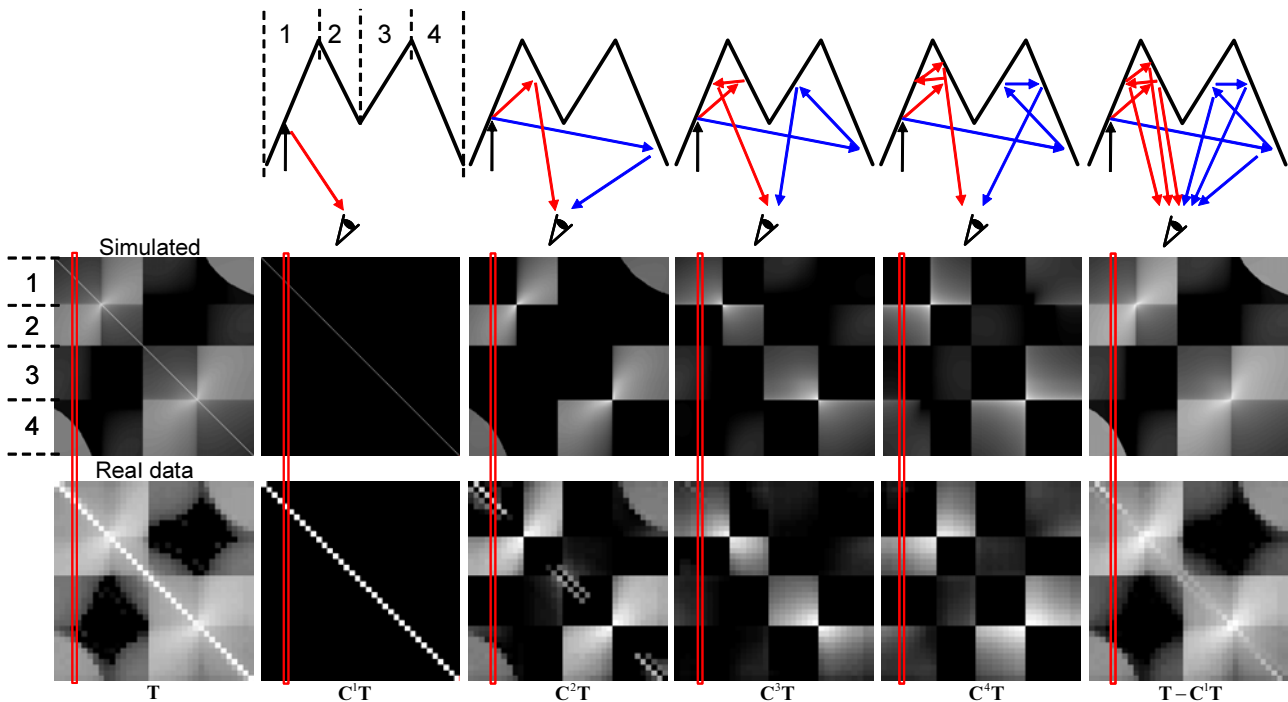


図. 5: “M” シーンにおける相互反射成分の推定. 上段の図は典型的な光の伝播を図示したものである. 中段はシミュレーションによる結果, 下段は実測データからの結果である. 中段と下段に関して左から右にかけて, ISF 行列 \mathbf{T} , ISF 行列の直接入射光成分 (一回反射成分), 二回反射成分, 三, 四回反射成分, そしてすべての相互反射成分を示す. (可視化のために log 画像を表示.)

接反射成分において $3.45e-34$, 三回反射成分において $8.59e-13$ と非常に小さい.

実測データによって手法を検証するために, シミュレーションで用いたシーンとほぼ同様の “M” シーンをつくり, 実験をおこなった (図 4). 実測データによる結果を図 5 の下段に示す. これを見ると, 結果はシミュレーションとほぼ一致していることが確認できる. シミュレーションとの主な差異は, 二回反射成分画像 $\mathbf{C}^2\mathbf{T}$ の対角成分付近の画素において非ゼロ値が見られることである. これはレンズフレアの影響であると考えられる.

未知光源下の一次元シーンにおける相互反射の解析

本手法の利点は, 入射光分布が任意で未知の場合においても n 回反射成分を推定できる点である. 図 6 に, 二つの異なる未知光源下における相互反射成分の推定結果を示す. 結果の画像は非常に複雑ではあるが, 直接反射成分画像 I^1 を見ると, その結果の正しさが定性的に確認できる. 本実験では, ダイナミックレンジの下限まで計算して 5 回反射成分画像まで計算することができた.

二次元シーンの相互反射成分の計算

さらに手法を検証するために, 図 7 のような二次元シーンを作成し同様の実験をおこなった. シーンは図に示すとおり, 箱の内部の三面からなるカドの部分である.

これらの三つの面の間での光の相互反射を観測するために, インパルス画像を計測する際のレーザー位置が三つの面に分布するようにした. 図 7 に, この二次元シーンの ISF 行列 \mathbf{T} を示す. この ISF 行列 \mathbf{T} の各列は図 7 左上に示した画像上のレーザー一点において, スキャンライン方向に輝度をサンプリングしたベクトルである. 図 8 に, この ISF 行列 \mathbf{T} から直接反射成分, 二~四回反射成分, そしてすべての相互反射成分を計算した結果を示す. さらに図 9 に, 三つの異なる未知の光源下において別々に撮影された画像と, 相互反射成分の推定結果を示す. このシーンに関する真値を計算することはできないが, n 回反射成分画像中に見られる反射の様子 (面から別の面へと跳ね返る挙動) は予測と一致する.

また, 図 10 にテクスチャ付き二次元シーンにおける相互反射成分の計算結果を示す. このシーンに関しては, ISF 行列 \mathbf{T} が視覚的に解釈しにくいので, ISF 行列の図示は割愛する. 図 10 の左図のシーンにおいて, ISF 行列を同様の手法によって計算し, それを用いて未知光源下のシーンでの相互反射成分の解析を行った. 図 10 右に示すように, テクスチャ付きのシーンにおいても, 計算された相互反射の挙動は予測と一致する.

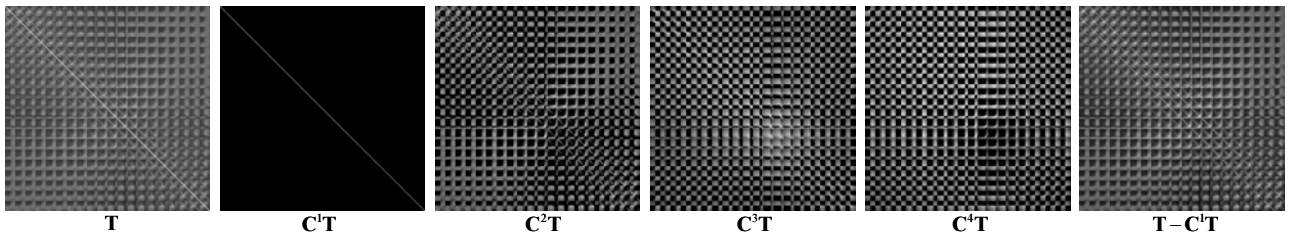


図. 8: 二次元シーンにおける相互反射成分の推定. 二次元シーンの ISF 行列 \mathbf{T} を直接反射成分 $\mathbf{C}^1\mathbf{T}$, 二回反射成分 $\mathbf{C}^2\mathbf{T}$, ..., すべての相互反射成分 $\mathbf{T} - \mathbf{C}^1\mathbf{T}$ に分解した結果を示す. (可視化のために log 画像を表示.)

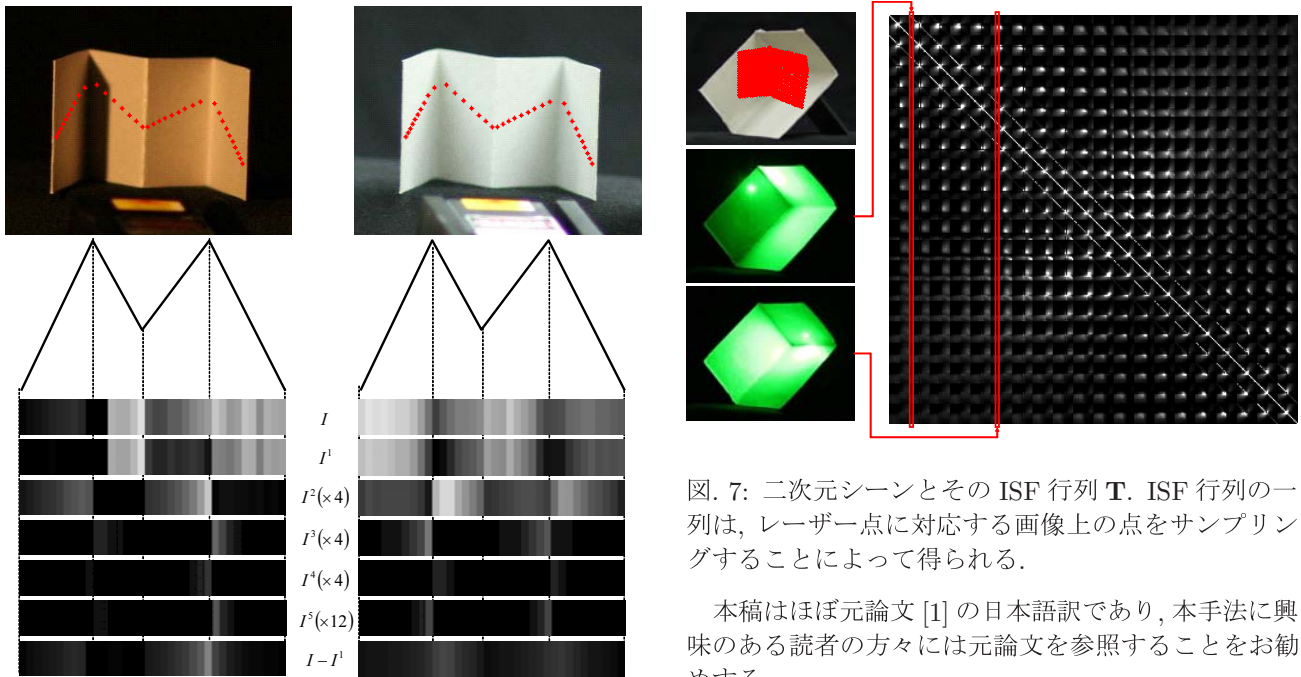


図. 6: 未知光源下の “M” シーンにおける相互反射成分の計算. 入力画像 I が, 直接反射成分 I^1 と, それに続く n 回反射成分 I^n に分解される. また, すべての相互反射成分 $I - I^1$ も同時に示す. 表示のために結果画像を線形にスケールした (括弧内は倍率を示す).

5 むすび

本稿では, 画像中から相互反射成分を計算・除去するための手法について述べた. その中で, シーンの形状・反射特性・光源分布がすべて未知である場合でも, 画像中から相互反射成分を除去する線形なオペレータが存在することを示した. さらに, 拡散反射面で構成されるシーンを用いて, そのような相互反射成分除去オペレータを実際に計算できることを, シミュレーションと実測データの両方によって示した. また, これを用いて相互反射の n 回反射成分を計算できることを実験し, 理論の正当性を示した. 今後の課題は, より効率よく ISF 行列を測定することと, 拡散反射で近似できないシーンについて ISF 行列を測定することである.

図. 7: 二次元シーンとその ISF 行列 \mathbf{T} . ISF 行列の一行は, レーザー一点に対応する画像上の点をサンプリングすることによって得られる.

本稿はほぼ元論文 [1] の日本語訳であり, 本手法に興味のある読者の方々には元論文を参照することをお勧めする.

References

- [1] S. M. Seitz, Y. Matsushita, K. N. Kutulakos, *A Theory of Inverse Light Transport*, Proc. of Int'l Conference on Computer Vision (ICCV), vol. 2, pp. 1440–1447, 2005.
- [2] J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner, and J. F. Hughes, *Computer Graphics: Principles and Practice*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990.
- [3] H. W. Jensen, *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*. Natick, MA: AK Peters, 2001.
- [4] D. S. Immel, M. F. Cohen, and D. P. Greenberg, “A radiosity method for non-diffuse environments,” *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, vol. 20, no. 4, pp. 133–142, 1986.
- [5] B. K. P. Horn, “Understanding image intensities,” *Artificial Intelligence*, vol. 8, no. 2, pp. 201–231, 1977.
- [6] J. J. Koenderink and A. J. van Doorn, “Geometric modes as a general method to treat diffuse interreflections in radiometry,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 73, no. 6, pp. 843–850, 1983.
- [7] P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H.-P. Duiker, W. Sarokin, and M. Sagar, “Acquiring the reflectance field of a human face,” in *ACM Trans. on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 145–156, 2000.
- [8] M. Goesele, H. P. A. Lensch, J. Lang, C. Fuchs, and H.-P.

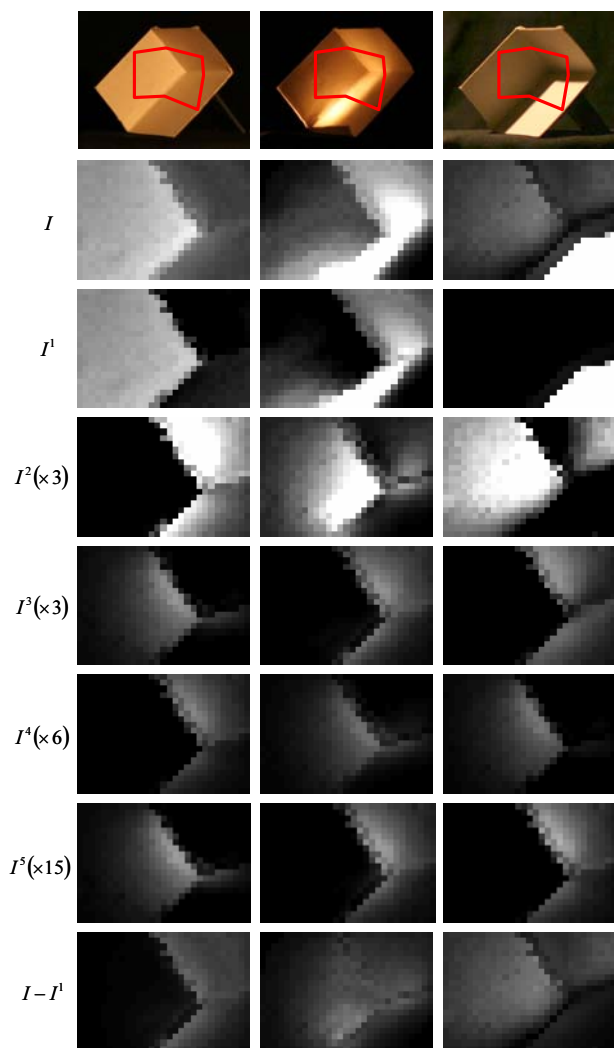


図. 9: 未知光源下における二次元シーンの相互反射成分の計算. 入力画像 I が, 直接反射成分 I^1 と, それに続く n 回反射成分 I^n に分解される. また, すべての相互反射成分 $I - I^1$ も同時に示す. 表示のために結果画像を線形にスケールした (括弧内は倍率を示す).

Seidel, “DISCO: acquisition of translucent objects,” *ACM Trans. on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, vol. 23, no. 3, pp. 835–844, 2004.

- [9] P. Sen, B. Chen, G. Garg, S. R. Marschner, M. Horowitz, M. Levoy, and H. P. Lensch, “Dual photography,” *ACM Trans. on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 745–755, 2005.
- [10] Y. Yu, P. E. Debevec, J. Malik, and T. Hawkins, “Inverse global illumination: Recovering reflectance models of real scenes from photographs,” in *ACM Trans. on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 215–224, 1999.
- [11] T. Machida, N. Yokoya, , and H. Takemura, “Surface reflectance modeling of real objects with interreflections,” in *Proc. of Int’l Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 170–177, 2003.
- [12] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, “Shape from interreflections,” *Int’l Journal of Computer Vision (IJCV)*,

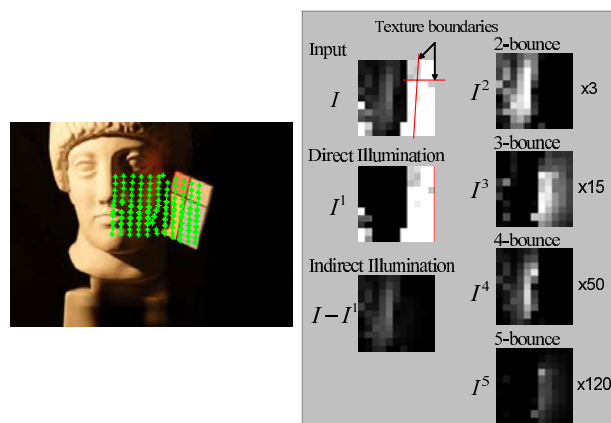


図. 10: 未知光源下における二次元のテクスチャ付きシーンの相互反射成分の計算. 入力画像 I が, 直接反射成分 I^1 と, それに続く n 回反射成分 I^n に分解される. また, すべての相互反射成分 $I - I^1$ も同時に示す. 二～五回反射成分は, 表示のために結果画像を線形にスケールした.

vol. 6, no. 3, pp. 173–195, 1991.

- [13] D. Forsyth and A. Zisserman, “Reflections on shading,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, vol. 13, no. 7, pp. 671–679, 1991.
- [14] S. A. Shafer, T. Kanade, G. J. Klinker, and C. L. Novak, “Physics-based models for early vision by machine,” in *Proc. SPIE 1250: Perceiving, Measuring, and Using Color*, pp. 222–235, 1990.
- [15] R. Bajcsy, S. W. Lee, and A. Leonardis, “Color image segmentation with detection of highlights and local illumination induced by inter-reflections,” in *Proc. of Int’l Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pp. 785–790, 1990.
- [16] B. V. Funt, M. S. Drew, and J. Ho, “Color constancy from mutual reflection,” *Int’l Journal of Computer Vision (IJCV)*, vol. 6, no. 1, pp. 5–24, 1991.
- [17] B. V. Funt and M. S. Drew, “Color space analysis of mutual illumination,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, vol. 15, no. 12, pp. 1319–1326, 1993.
- [18] L. McMillan and G. Bishop, “Plenoptic modeling: An image-based rendering system,” in *ACM Trans. on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 39–46, 1995.
- [19] M. Levoy and P. Hanrahan, “Light field rendering,” in *ACM Trans. on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 31–42, 1996.
- [20] S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, and M. F. Cohen, “The lumigraph,” in *ACM Trans. on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 43–54, 1996.
- [21] J. T. Kajiya, “The rendering equation,” *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 86)*, vol. 20, no. 4, pp. 143–150, 1986.
- [22] A. S. Glassner, *Principles of digital image synthesis*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1995.
- [23] T. Mitsunaga and S. Nayar, “Radiometric self calibration,” in *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 374–380, 1999.