

## 直接成分と間接成分の分離に基づく照明光の伝播解析

那 須 督<sup>†1</sup> 日 浦 慎 作<sup>†1</sup> 佐 藤 宏 介<sup>†1</sup>

シーンへの入射光分布と物体表面の輝度との関係であるライトトランスポートは照明シミュレーション等に有用であるが、その計測には長時間を要し、データ量も膨大である。そこで本論文では、光源からの光がシーン内で最初に反射した結果観測される直接反射成分と、シーン内で複数回反射した結果観測される間接反射成分を分けて計測することで高速化する手法を提案する。まず、プロジェクタとカメラの各画素の幾何的な対応関係を取得し、それに基づき並列的に直接成分を計測する。また間接成分については、その空間周波数が低周波数成分に限定されることを利用して高速化を図る。

### Analysis of Light Transport Based on the Separation of Direct and Indirect Components

OSAMU NASU,<sup>†1</sup> SHINSAKU HIURA<sup>†1</sup> and KOSUKE SATO<sup>†1</sup>

Light transport is one of the useful representations of complex optical phenomena inside a scene. However, it is difficult to obtain enough sample under various lighting condition with large degrees of freedom. Therefore, in this paper, we propose a fast and efficient sampling method using the characteristics of direct and indirect components of reflected light. At first, we obtain the geometric relationships between projector and camera, then repetitive dot pattern is projected to the scene for acquiring direct reflection component. Finally, stripe pattern in a small rectangular is used to measure the indirect light distribution spread within the low-frequency domain.

#### 1. はじめに

カメラにより撮影した画像は、シーン内の物体表面上の輝度情報を記録したものである。しかし多くの場合、被写体は発光せず、照明からの光が物体表面で反射することで輝度が決定する。このとき、物体が光源から直接照明を受けることに加え、これらの物体が二次的な光源として相互に照明し合うことによりシーンの輝度分布が決定する。従来、様々な照明条件の下での画像を求めるには、これらの現象をシーンの三次元形状情報を用いて計算する手法が多く用いられてきた<sup>8)</sup>。しかし実シーンを計測により正確にモデル化することは容易ではない。そこで本論文では、多くの画像をモデル表現に使用するイメージベーストレンダリングによりシーンへの光の入出力関係のモデル化を行う。

任意の光源を光源位置と光線方向に分解し、それらの組合せにより光源が構成されると考えたとき、シーン上の任意の点の輝度変化は、個々の光線が入射したときの輝度の線形結合で表される。この関係をライトトランスポートと呼び、これにより異なる照明条件下におけるシーン画像の再構成が可能である。Sen ら<sup>1)</sup>はこのライトトランスポートの取得について、互いに独立に観測できる光線の組合せを求めることで高速化を行う手法を提案している。しかし間接反射成分が広範囲にわたる場合は独立性が低下し、高速化が期待できないという問題がある。また Seitz ら<sup>2)</sup>はシーンにスポット光を照射することでライトトランスポートを解析する手法を提案しているが、高速化は考慮されていない。そこで我々はシーンの輝度分布を直接反射成分と間接反射成分に分離することでライトトランスポート計測の高速化を図る。Nayar ら<sup>3)</sup>はパターン光をシーンに照射することで間接成分と直接成分を分離する手法を提案している。我々の手法にはこの原理を利用しているが、各成分の分離だけでなく、ライトトランスポートを求めている点が新規である。

#### 2. ライトトランスポートの計測

##### 2.1 ライトトランスポート

本論文では光源は単一であるとし、これにプロジェクタを使用することでライトトランスポートを解析する。プロジェクタの各画素値を投影画像列ベクトル  $p$  としたとき、カメラ観測画像ベクトル  $c$  は以下のような線形の式で表される。

$$c = \mathbf{T}p \tag{1}$$

ここで行列  $\mathbf{T}$  をライトトランスポート行列と呼ぶ。

最も簡単なライトトランスポートの計測は、プロジェクタ画素を1つずつ点灯し、その

<sup>†1</sup> 大阪大学大学院基礎工学研究科

Graduate School of Engineering of Science, Osaka University

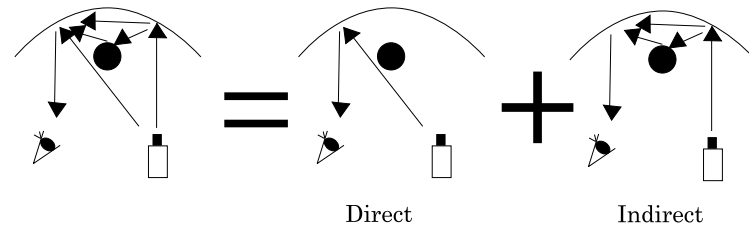


図 1 直接成分と間接成分

Fig. 1 Direct and Indirect components.

ときのカメラ観測画像から行列  $\mathbf{T}$  の各列を求める手法である。これはシンプルではあるが、計測に長時間を要するうえ、行列が大きく計測データ量が膨大になる。たとえばプロジェクタの解像度を  $(M_p, N_p)$ 、カメラの解像度を  $(M_c, N_c)$  とすると、投影回数は  $M_p N_p$  回、行列  $\mathbf{T}$  の要素数は  $M_p N_p M_c N_c$  となる。また、1点のみの投影では光源強度が小さいために、間接反射成分が非常に暗くなり、カメラ画像上では量子化やノイズの影響で観測が困難である。

## 2.2 直接成分と間接成分の分離

シーン内で反射してカメラへ入射する光は一般に、図 1 のようにその反射回数により直接 (Direct) 成分と間接 (Indirect) 成分の 2 つに分けられる。直接成分は、プロジェクタから実際に光が照射されている部分のみで観測される。それに対し、シーン中に鏡のような強い正反射を持つ表面がないと仮定すると、間接成分は比較的広い領域に拡散し、空間周波数においては低周波領域に応答が集中する。そこで Nayar ら<sup>3)</sup> は縞パターンのような空間的に高周波のパターン光をずらしながら照射することでこれらの成分を分離した。縞の暗部では間接成分しか観測されないのに対し、明部では直接成分と間接成分の両方が観測されるため、各画素における時系列値の最大値と最小値の間の加減算により各成分が分離できる。

なお、同様に周波数帯域の立場からシーンを解析する研究としては、光源の分布に関するもの<sup>5)</sup> や視点の位置に関するもの<sup>6),7)</sup> があり、より少ないデータによって十分な品質の画像を再現するための基礎的な考え方となっている。

## 2.3 直接成分のライトトランスポート計測

プロジェクタのある画素に対応した光線と物体表面との交点が、カメラのある画素により観測されるとき、その画素はプロジェクタ画素と幾何学的に対応していると呼ぶこととする。明らかに、プロジェクタのある画素に対応する直接成分は幾何学的に対応する 1 点に集

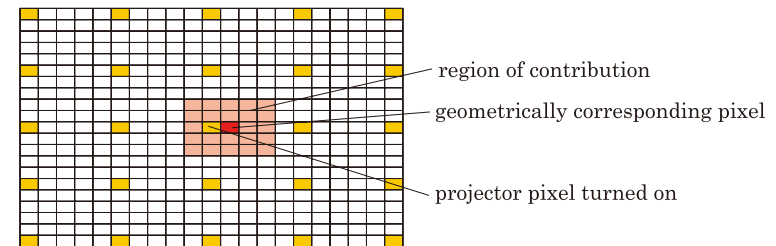


図 2 直接成分計測に用いる投影パターン

Fig. 2 Projection pattern for direct component measurement.

中し、他の部分では観測されない。実際には各ピクセルの面積を考慮する必要があるため、カメラの各画素の輝度の直接成分に寄与する範囲はプロジェクタ画像上で  $l \times l$  画素の範囲に限定されると仮定し、高速化およびデータ削減を行う。

まず、グレーコードパターン光投影法<sup>4)</sup>によりそれぞれのカメラ画素に対し幾何学的に対応したプロジェクタ画素の座標を求める。次に、図 2 に示すようにプロジェクタにおいて縦・横それぞれ  $l$  画素おきに 1 画素を点灯したパターンをずらしながら  $l^2$  回投影する。カメラの各画素に影響を及ぼすプロジェクタ画素の範囲は、カメラ画素に幾何学的に対応したプロジェクタ画素を中心に幅と高さが  $l$  の範囲であると考え、観測しているカメラ画素に寄与する点灯画素を 1 つに決定する。ただしここでは直接成分のみを抽出する必要があるため、 $l^2$  回の投影のうち、観測された画素値が最も小さいときの値を間接成分とし、それをすべての観測値から減じることで直接成分のみを求める<sup>3)</sup>。グレーコードの二値化に差分二値化<sup>4)</sup>を用いた場合、投影パターン数は  $2 \log_2(M_p N_p) + l^2$  となり、全画素を順次点灯する場合の  $M_p N_p$  に比べ大幅にシーンの観測回数を減少させることができる。また直接成分に関するライトトランスポート行列  $\mathbf{T}_d$  は、それぞれのカメラ画素に寄与するプロジェクタ画素の数が  $l^2$  であることから、非零の要素数は  $M_c N_c l^2$  となる。そこでそれぞれのカメラ画素について、その画素に幾何学的に対応するプロジェクタ画素の座標と、その周囲  $l^2$  のライトトランスポートだけを保持することにより記憶に要する要素数を  $M_c N_c (l^2 + 2)$  と小さくすることができる。

## 2.4 間接成分のライトトランスポート計測

間接成分については、それぞれのカメラ観測画素の輝度値には、多くのプロジェクタ画素からの光が寄与する。これは信号処理において連続するサンプル値の重み付き平均を求めことに相当し、原信号の空間周波数成分に対しローパスフィルタの働きを持つ。もしプロ

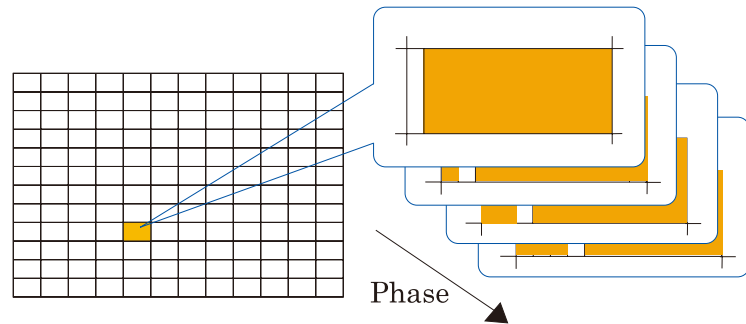


図 3 間接成分計測に用いる投影パターン  
Fig. 3 Projection pattern for indirect component measurement.

ジェクタ投影パターンに対するカメラ画素値の間接成分の応答が、反射現象により帯域制限されていると仮定すると\*1, サンプリング定理に基づき, プロジェクタ投影パターンのサンプリング周波数は遮断周波数の 2 倍で十分であることになる. そこで間接成分の観測においては, プロジェクタの解像度をより低いものと見なし, 投影回数とデータ量を削減する. またこれにより, 多くの画素が同時に点灯されることで, 1 画素点灯では検出が困難であった弱い応答が検出可能となる.

ここではプロジェクタの画素を横  $m$ , 縦  $n$  の長方形ごとにブロックとしてまとめて取り扱う. ただしここでも間接成分のみを抽出するため Nayar らの手法<sup>3)</sup> を用い, ブロック内には図 3 のようにスリット状に一部の画素を消灯したパターンをずらしながら  $o$  回投影する. このとき, カメラ観測画像のそれぞれの画素において, 最も明度が小さいときの値を間接成分として抽出する. これにより, 観測回数は  $M_p N_p$  から  $\frac{o M_p N_p}{mn}$  に減少する. また間接成分に関するライトトランスポート行列  $T_g$  の要素数は  $\frac{M_p N_p M_c N_c}{mn}$  である.

### 3. 実験結果

実験ではプロジェクタに Epson ELP-703, カメラに Sony DFW-VL500 を用いた. また, 本実験では直接成分計測の影響領域を 5 画素四方, 間接成分計測における低解像度化ではその効果と問題点が明確に分かるように縦横 32 画素をまとめて単位投影領域とした. 2 章における各値は  $M_p = 768, N_p = 1024, M_c = 480, N_c = 640, l = 5, m = 32, n = 32$ ,

\*1 ある周波数より高周波の成分を通過させないフィルタを帯域制限フィルタという.

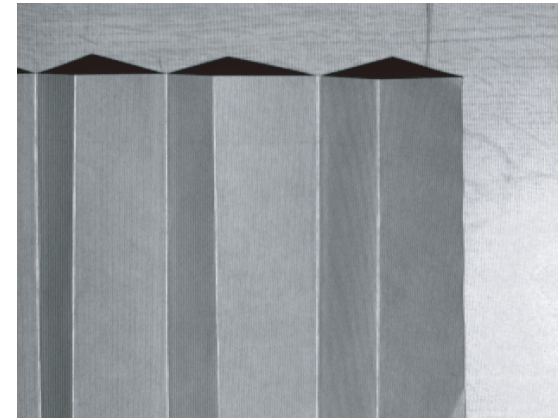


図 4 計測対象シーン  
Fig. 4 Measured scene for experiment.

$o = 16$  である. プロジェクタ以外の光の影響を除くため計測はすべて暗室環境下で行った. カメラへのコマンド送信によりカメラのガンマ特性を 1 とした. プロジェクタはすべての画素値が最大輝度もしくは最小輝度のどちらかであるため, ガンマ特性の補正は必要ない. またプロジェクタの消灯時の光の漏れを補償するため, 全画素消灯時の画像をすべての画素から減じた.

#### 3.1 ライトトランスポートの計測結果

相互反射を生じる対象として, 図 4 のような山と谷のあるシーンに対して計測を行った. ライトトランスポートを計測した結果から, プロジェクタ全点灯時の直接反射成分と間接反射成分を算出したものが図 5 である. 図 4 では光源に対し傾きの大きな面が, 反対側の面により照明され明るくなっているところ, 図 5 (a) の直接成分ではそれが取り除かれ, 面の傾きに応じた輝度分布が得られていることが分かる. また間接反射成分は図 5 (b) より, 谷の部分で相互反射が生じていることが分かる. ただしブロック単位で処理していることから, ブロックの境界においてアーティファクトが観察される.

#### 3.2 照明効果シミュレーション

計測されたライトトランスポートを用いて計測環境とは異なる照明条件下での観測画像の推定を行った. 図 6 (a) は「SENS」という文字を投影した際に観測される画像の推定結果である. また図 6 (b) は比較のために, 実際に「SENS」という文字を対象に実際に投影

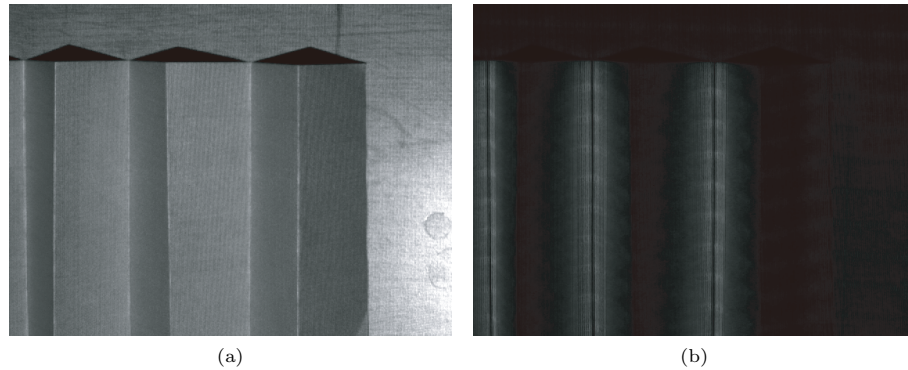


図 5 直接反射成分と間接反射成分  
Fig. 5 Direct and indirect component.



図 6 照明効果推定結果と実パターン投影結果  
Fig. 6 Generated and actual image under synthetic lighting condition.

した結果である．図 6 (a) では谷状の部分 (E と N の間や, N と S の間) のうち, 文字が投影された部分の付近では相互反射が再現され, また照明を受けていない画面の下部ではそれが見られない．このように, ライトトランスポートを計測することで計測環境とは異なる照明環境下での観測画像を合成することができた．また, その際に, 谷の部分で起きている相互反射も再現することができた．ただしここでは間接成分の計測のために 1 辺 32 画素と

いう大きなブロックを用いたため, これによるアーティファクトが見られる．ブロックの大きさと再生画像の品質にはトレードオフがある．

#### 4. 結 論

本論文ではシーンへの光の入出力関係を記述する方法の 1 つであるライトトランスポート計測の高速化に関する手法を提案した．ライトトランスポートの計測において, 1 画素ごとに投影し画像データを取得する方法では計測に長大な時間がかかるとともに, 結果として得られるデータも非常に大きくなってしまふ．そこで本論文では間接成分と直接成分を分離し, それぞれの性質を利用することでより高速で効率的な計測手法を提案した．

ライトトランスポートの計測結果として, 3 章に示したように間接成分の計測結果にはブロックパターンによる境界が現れている．また, ごく小さな値に関しては観測できていない個所がある．これらを改善するために, 矩形のブロックではなく重なりを持つガウス分布のような投影パターンを今後検討する予定である．また, 直接成分の推定における影響領域の広さや間接成分計測時のブロックサイズを決定する方法も検討する必要がある．本手法をシーンの relighting<sup>9),10)</sup> に適用し, 間接反射成分の影響を除去するような応用についても今後の課題である．

#### 参 考 文 献

- 1) Sen, P., Chen, B., Garg, G., Marscher, S., Horowitz, M., Levoy, M. and Lesch, H.: Dual Photography, *Trans. Graphics*, Vol.24, No.3, pp.745-755 (2005).
- 2) Seitz, S., Matsushita, Y. and Kutulakos, K.: A Theory of Inverse Light Transport, *Proc. ICCV*, Vol.2, pp.1440-1447 (2005).
- 3) Nayar, S., Krichnan, G., Grossberg, M. and Raskar, R.: Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination, *Trans. Graphics*, Vol.25, No.3, pp.935-943 (2006).
- 4) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990).
- 5) 佐藤いまり, 岡部孝弘, 佐藤洋一, 池内克史: 任意光源環境における画像生成のための見えの標準化, *情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア*, Vol.47, No.SIG10 (CVIM15), pp.107-119 (2006).
- 6) Shum, H.Y., Li, Y. and Kang, S.B.: *An introduction to image-based rendering*, Kluwer Academic Publishers (2004).
- 7) Zhang, C. and Chen, T.: Generalized plenoptic sampling, Technical Report AMP01-06, Carnegie Mellon University (2001).
- 8) Mukaigawa, Y., Kakinuma, T. and Ohta, Y.: A fast compensation method of

inter-reflection for pattern projection onto a non-planar surface, *Proc. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2006)*, pp.9-10 (2006).

- 9) 向川康博, 永井悠文, 大田友一: SpaceRelighter: パターン投影による照明環境の再現, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.10, No.2, pp.155-162 (2005).
- 10) 向川康博, 西山正志, 尺長 健: スクリーン物体への光学パターン投影による仮想光学環境の実現, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol.84-D-II, No.7, pp.1448-1455 (2001).

(平成 19 年 9 月 10 日受付)

(平成 20 年 3 月 9 日採録)

(担当編集委員 佐藤 洋一)



那須 督

1983 年生。2007 年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。現在、同大学院基礎工学研究科博士前期課程に在学。画像処理の研究に従事。2007 年情報処理学会 CVIM 研究会卒論セッション優秀賞受賞。



日浦 慎作 (正会員)

1972 年生。1993 年大阪大学基礎工学部制御工学科飛び級中退, 1997 年同大学大学院博士課程短期修了。同年京都大学リサーチアソシエイト, 1999 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手, 2003 年同助教授, 現准教授。三次元画像計測・処理とその VR・コミュニケーション応用の研究に従事。1993 年電気関係学会関西支部連合大会奨励賞, 2000 年画像センシングシンポジウム優秀論文賞受賞。電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。博士(工学)。



佐藤 宏介 (正会員)

1962 年生。1983 年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1985 年同大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。1986 年大阪大学基礎工学部助手。1988 年カーネギーメロン大学ロボット工学研究所客員研究員。1992 年大阪大学基礎工学部講師。1994 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。1999 年大阪大学大学院基礎工学研究科助教授。2003 年同教授。3 次元画像計測, 仮想現実感, デジタルアーカイブ等の映像情報メディアの研究に従事。1987 年篠原記念学術奨励賞受賞。色彩学会, VR 学会, IEEE 等各会員。