

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 日浦 慎作 佐藤 宏介
大阪大学大学院 基礎工学研究科
560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
Tel +81-6-6850-6372 nasu@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp

あらまし：ライトトランスポートはシーン内の複雑な光学現象により決定される画像の変化を記述する有効な手法の一つである。しかし、ライトトランスポートの計測には長大な時間を要し、得られるデータも膨大になってしまう。そこで、本論文では光源からの光がシーン内で初めて反射した結果として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として観測される間接反射成分を分けて計測することでこれらの問題を解決する手法を提案する。また、計測したライトトランスポートを用いて計測環境とは異なった照明条件下におけるシーンの照明効果シミュレーションも行う。

Analysis Light Transport based on the Separation of Direct and Indirect Components

Osamu Nasu Shinsaku Hiura Kosuke Sato
Graduate School of Engineering Science, Osaka University
Machikaneyama-cho 1-3, Toyonaka, Osaka, 560-8531, Japan
Tel +81-6-6850-6372 nasu@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp

Abstract : Light transport is one of the useful representation of optical phenomena inside a scene. However, it is difficult to obtain enough sample under varied lighting condition, because the light source has large degrees of freedom. Therefore, in this paper, we propose a fast and efficient sampling method using characteristics of direct and indirect components. At first, we obtain geometric relationships between projector and camera, then repetitive dot pattern is projected to acquire direct reflection component. Finally, stripe pattern in a small rectangular is projected to measure low-frequency indirect light distribution.

1 はじめに

カメラにより撮影された画像は、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。このとき観測される画像は、光源からの照明を受けたシーンの直接の反射成分 (Direct) だけではない。光を受けた点はそれ自身も二次的な光源のように働き、相互に照明し合うことによる間接成分 (Indirect) が直接反射成分と重ねあわせられ、シー

ンの輝度分布が決定される。このような複雑な光の入出力関係を、ある照明条件下における一枚の画像から推定することは非常に困難である。そのため、一般にシーンに関するモデルを設定し、さまざまな観測結果を統合することで光の入出力を記述する。そのようなモデルの典型として三次元形状情報とその表面の反射特性をモデルに持つものがある。しかし、画像からこのモデルの復元を行う際はシーンが複雑になるにしたがってその処理も複雑になるという問題がある。

より直接的に画像からモデル表現を得る手法としてイメージベースレンダリングがある。これは、幾何的な情報ではなく実際に撮影したシーンの画像を含む多くの画像をモデルとして持つ。本論文では、光源から発せられる光線と、その照明を受けたシーンを撮影した画像の間の光の入出力関係をライトトランスポートと呼び、これをモデルとする。このような光の入出力関係を得ることで容易に任意の照明条件下におけるシーンの画像のシミュレーションが行えるようになる。Senら [1] はこの光の入出力関係を用いて照明であるプロジェクタに視点を設定したときの画像の再構成を行った。また、その入出力関係の計測について高速なアルゴリズムも紹介している。しかし、Indirect成分がシーン内において広範囲にわたると大幅な高速化ができなくなってしまうという問題がある。本論文では、この手法とは違った手法で高速化を実現する。

光源から入射した後シーン上で反射することで観測される光は、シーン内で一回反射するのみで観測される直接反射成分 (Direct) と、シーン内の点が二次的な光源のように働いた結果観測される間接反射成分 (Indirect) に分けることができる。リアルタイムレンダリングでは、その計算量などの問題でほとんどの場合 Direct 成分のみを計算している。しかし、Indirect 成分を考慮した画像生成手法も Kajiya ら [4] によって定式化されるなど、さまざまな研究が進んでいる。Seitz ら [3] はシーンを小さなパッチに分け、ライトトランスポートをその反射回数ごとに分ける手法を提案した。Nayar ら [2] は Direct/Indirect の各成分を高速に分離する手法を提案している。この手法は、Indirect 成分は高周波帯域には大きな応答を持たないという仮定に基づいている。すなわち、ある点に入射した光により生じる Indirect 成分はシーン内で広がりを持った拡散したものとなるということである。ただし、鏡などによって拡散されない間接反射成分が観測される場合は、この仮定は成立しない。一方で、Direct 成分は一回の反射のみの直接反射であるためプロジェクタとカメラ間の幾何的な対応関係により表現できる。このため、Direct 成分においては Indirect 成分に見られたような拡散性は見られない。

本論文は、2章において光の入出力関係を示すライトトランスポートと Direct/Indirect 成分の分離

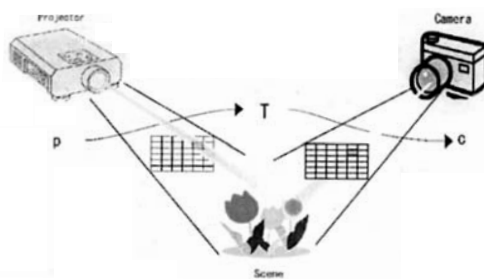


図 1: ライトトランスポートと光の入出力

について述べ、3章においてこれら二成分を別々に計測する手法を述べる。そして、4章において実際のシーンを計測した結果を示し、計測結果を用いてそのシーンにおける照明効果シミュレーションを行った結果を示す。最後に5章において本論文をまとめる。

2 光の伝播と反射成分の分離

2.1 ライトトランスポート

本論文では、シーンにおける光の入出力を表すライトトランスポートの計測にあたり、照明をプロジェクタ、観測をカメラで行うものとし、それぞれあらかじめ決められた一点に固定するものとする。このようにすることで、プロジェクタからシーンへの光の入力とカメラで観測される光の出力は

$$c = Tp \quad (1)$$

のような線形の式で表すことができる。ここで c はカメラで観測される画像を表す列ベクトル、 p はプロジェクタの投影画像を表す列ベクトルとする。これら二つの列ベクトルの変換行列である T がライトトランスポートである。図1はカメラ、プロジェクタ、シーンとそれらの入出力関係を表したものである。プロジェクタからの光の入力は任意に制御でき、その各々の場合についてカメラで観測される画像の値を得ることができるので、行列 T の自由度にあわせて複数の投影に対する観測画像を得ることでライトトランスポートである行列 T を決定することができる。

最も簡単なライトトランスポートの取得の手法は、プロジェクタピクセルを順次投影しそれを観

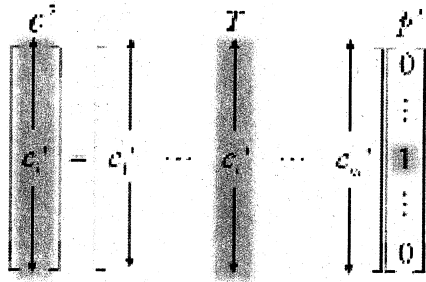


図 2: BruteForce 法による計測. プロジェクタのあるピクセルのみを投影すると, カメラで観測された値はそれに対応した行列 T の列要素に一致する.

測するものである. 図 2 に示すように, 各ピクセルのみの投影時に観測される画像が行列 T の列成分となる. このようにして, すべてのプロジェクタピクセルを順次投影することで行列 T の全列要素を得ることができる. この手法を BruteForce 法と呼ぶ. この手法はシンプルで非常に有効であるが, 計測に非常に長い時間がかかることと計測された行列が非常に大きくデータ量が膨大になるという問題がある. たとえば, プロジェクタの解像度を XGA (1024×768 ピクセル), カメラの解像度を VGA (640×480 ピクセル) とすると BruteForce 法でのプロジェクタからの投影回数はプロジェクタピクセル数である 786,432 回となる. 行列 T は列数がプロジェクタピクセル数, 行数がカメラのピクセル数になるので一要素を 1byte で確保したとしても約 241GB が必要となってしまふ. Senら [1] は互いに干渉しない独立したピクセルを同時に投影することでこの問題を解決した. この手法は非常に高速で効率的な計測を可能とする一方でその実装は非常に複雑である. また, Indirect 成分が広範囲にわたって大きな値で分布する場合はその効率化を発揮できないという問題もはらんでいる.

2.2 直接反射成分と間接反射成分

シーン内で反射してカメラへと出力される光は図 3 のようにその反射回数で Direct と Indirect の二つの成分に分けることができる. プロジェクタから投影された光がカメラで観測されるまでにシーン内で反射する回数が, Direct 成分が 1 回のみであるのに対して Indirect 成分は複数回である. つ

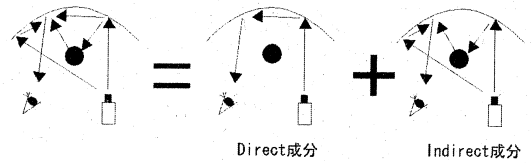


図 3: オクルージョンと観測値. 観測される値はオクルーダーによって不可視となっている領域における反射の結果も含まれている.

まり, Direct 成分はプロジェクタから入射した光がシーンを直接照明した結果の反射として観測されるものである. それゆえに, プロジェクタとカメラの幾何的対応関係でシーン内での反射をモデル化することができる. Indirect 成分は他の点からの反射光を受けてその反射として観測されるものである. 複数回の反射はシーン内で照明を受けた点自身が二次的な照明として働き他の点を照明していることによる. このような現象は複雑で, 幾何学的モデルによる再現は難しい. 特に, 図 3 のようにカメラから不可視の部分も Indirect 成分に寄与している場合, 画像からその部分の三次元形状情報を推測するのは困難である. そのため, 光学的関係を得ることでモデル化を行う.

この Direct/Indirect 成分の性質を考察する. 図 4 は Direct/Indirect の両成分のシーン内での反射を表している. Direct 成分は図 4(a) に示したように幾何的な対応関係のあるピクセルにおいて強い値を示す. 一方で, Indirect 成分はその反射の仕方によっていくつかに分類される. その代表的なものが図 4(b)(c)(d) である. 図 4(b) は相互反射と呼ばれ, 光を受けたシーン内の点が二次的な照明のように働くことによって他の点を照明する. 図 4(c) は表面下散乱と呼ばれ, これは, 物体表面で光が反射せずその面内にしみこんでから反射する現象で大理石や人の皮膚などで観測される. この成分は素材の質感表現に影響する. 図 4(d) は三次元拡散と呼ばれ, ミルクなど半透明なものに入った光が三次元的に拡散して全体を明るくするものである. これら Indirect 成分は反射や散乱の過程で広がりを持つとともにその強さも弱められているという性質を持つ. ただし, 図 5 のように強い正反射成分を持つ表面においては Direct 成分同様に拡散しないまま相互反射が起こる.

鏡のような強い正反射成分を持つ表面がないと

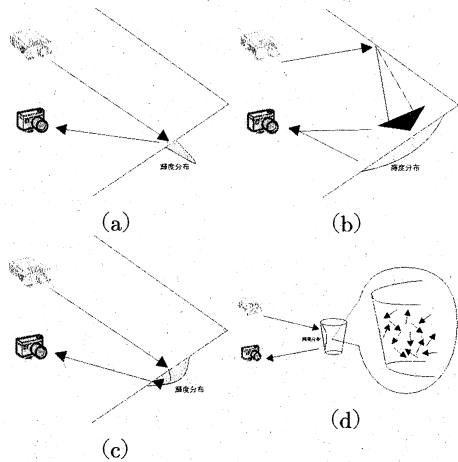


図 4: Direct/Indirect 成分の反射. (a)Direct 成分の反射. (b)相互反射. (c)表面下散乱. (d)三次元拡散

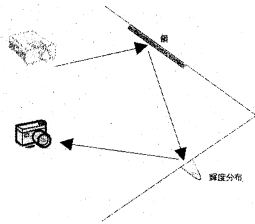


図 5: 鏡などの強い正反射成分を持つ表面では相互反射は拡散しない。

仮定すると, Direct/Indirect 成分は非常に簡単な方法で分離することができる [2]. この手法では図 6 のように空間的に高周波なパターンを投影する. プロジェクタからの直接の投影がない場合は Indirect 成分のみが, 直接の投影を受けている場合は Direct/Indirect 成分の両方が含まれている. そこでパターンをずらしながら複数投影し, それらから各ピクセルに対し最大・最小の値を集めた画像を生成することで二つの成分を分離することが可能となる. 最大値を集めた画像を L^+ , 最小値を集めた画像を L^- , Direct 成分を L_d , Indirect 成分を L_g とすると

$$\begin{cases} L^+ = L_d + \alpha L_g \\ L^- = (1 - \alpha)L_g \end{cases} \quad (2)$$

となる. ここで α はプロジェクタにおける投影領域がシーン全体に占める割合を示す. L^+ , L^-

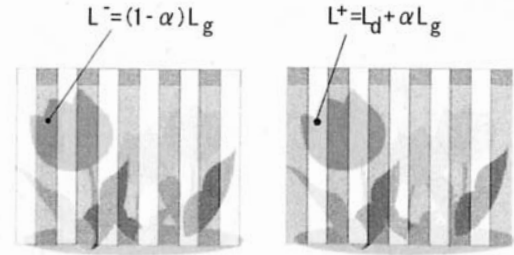


図 6: 高周波パターンの投影による Direct/Indirect 成分の分離.

は観測されるためこれらの式を解くことで Direct/Indirect 成分が計算できる.

3 ライトトランスポートの計測

2.2 節で述べたように, Direct/Indirect の両成分はそれぞれ異なる性質を持っている. 本論文ではこれらの性質を利用し, より効率的で高速なライトトランスポートの計測手法を提案する. 以下, 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) としてシーンに対するライトトランスポートの計測手法を説明する.

3.1 直接反射成分の計測

Direct 成分はシーン上においてプロジェクタとカメラの画素が幾何的に対応しているときに大きな値が観測される. この幾何的な対応関係はグレーコードパターン投影法によって得ることができる [5]. この対応点に限って計測することで, BruteForce 法では各プロジェクタピクセルを順次投影していたのに対して, 理論上は一度にプロジェクタの全ピクセルを投影することで計測が可能となる. しかし, シーン上においてカメラとプロジェクタのピクセルが完全に重なっているとは限らず, また両者の解像度も違うことからこの手法では正確な計測が可能とはならない. そこで本手法ではプロジェクタピクセルに関して $l \times l$ の小さな影響領域を設定し, カメラの各ピクセルは図 7 のように対応する領域から影響を受けるものとする. これにより図 8 に示したようなパターンを l^2 回投影することで, より正確な計測が可能となる. また, l^2 回パターンを投影しているので, これを用いて 2.2 節

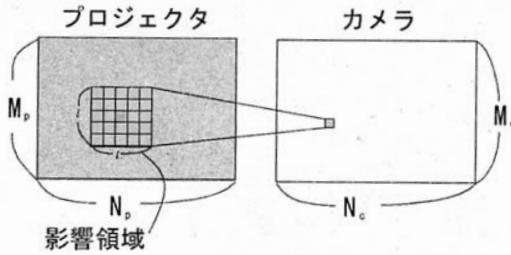
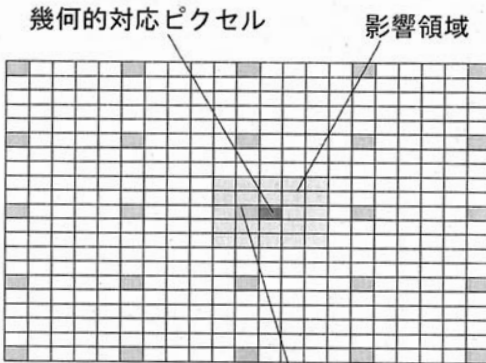


図 7: Direct 成分に関する影響領域.



影響を与えているプロジェクタピクセル

図 8: Direct 成分計測に用いる投影パターン.

で述べたようにして Direct 成分のみを抽出することができる.

3.2 間接反射成分の計測

Indirect 成分は複数回繰り返される反射の過程でその影響の領域が広がりを持つとともに輝度が減少する性質がある. 前者の性質は図 9 に示したように空間的に低周波数帯域に応答が集中することを意味し, 高周波帯域を省いて近似的に計測することが可能である. そこで, サンプリング定理に基づき投影するパターンを空間的に低周波なもの, すなわち複数のピクセルをまとめて単位投影領域とし, これを同時に投影するものとしてプロジェクタの解像度を落としてパターンを投影することとする. これによって, 低解像度化した分だけ投影回数を減らした BruteForce 法によって高周波帯域を除いた近似的なライトトランスポートの高速で効率的な計測が可能となる. また, Direct 成分に比べて Indirect 成分は一点への投影に対する応

答が小さいため BruteForce 法では Indirect 成分を検出できない可能性もある. しかし, 本手法のように低解像度化し広い単位投影領域を設定することでこの問題を解決できる. ただし, 単位投影領域内全体を投影する方法では Indirect 成分のみの抽出は不可能であるため図 10 に示したように単位投影領域内をさらに分割し高周波パターンを位相をずらしながら複数回投影することで 2.2 節で述べたようにして Indirect 成分のみを抽出することとする. たとえば, 低解像度化の割合を (m, n) とするとプロジェクタの解像度は $(M_p/m, N_p/n)$ となり, 単位投影領域内に投影する高周波パターン数を h とすると投影パターン数は $\frac{M_p N_p}{mn} \times h$ 回となる.

4 実験結果

提案手法を用いて実際に計測を行った. 機材の様子は表 1 に示したとおりである. 3 章における各値は $M_p = 768, N_p = 1024, M_c = 480, N_c = 640$ となる. また, 本実験では Direct 成分計測の影響領域を 5 ピクセル四方, Indirect 成分における低解像度化の割合を 32, すなわち $l = 5, m = 32, n = 32$ とした. また, プロジェクタ以外の光の影響を排除するため計測はすべて暗室環境下で行った.

4.1 ライトトランスポートの計測結果

図 11 はライトトランスポートの計測対象シーンである. このシーンに対しライトトランスポートを計測した結果が図 12, 図 13 である. ただし, ライトトランスポートの計測結果はプロジェクタの全ピクセルを投影した際に得られる画像のシミュ

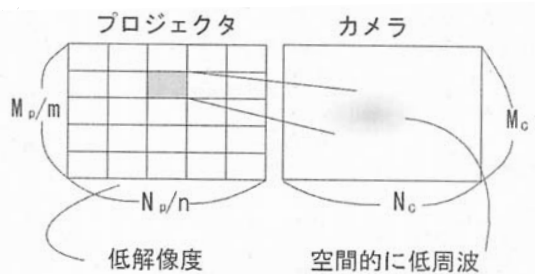


図 9: Indirect 成分の影響とプロジェクタの低解像度化.

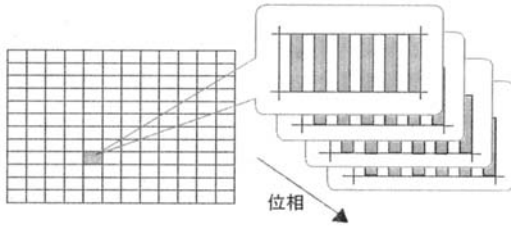


図 10: Indirect 成分計測に用いる投影パターン.

レーション結果として示している。前者は Direct 成分で、Indirect 成分を含まないため物体の内側が実際より暗くなっていることがわかる。後者は Indirect 成分で、物体の内側で相互反射が起きていることがわかる。図 14, 図 15, 図 16 は別のシーンに対して計測を行った結果である。同様に Direct 成分では光源と反対を向いた面において実際より暗くなり、Indirect 成分において相互反射によって谷の部分に値が集中するということが確認された。

4.2 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照明効果のシミュレーションを行った。図 17 はシーンの右半分のみを照明した場合に観測される画像を合成したもの、図 18 はシーンの左から右へ行くほど明るい照明を当てた場合に観測される画像を合成したものである。このように、ライトトランスポートを計測することでそれを用いて計測環境下とは異なる照明環境下での観測画像の合成に成功した。

表 1: 実験機材の仕様

	機材	仕様
PC	OS	VineLinux
	CPU	Pentium4 2.66GHz
	メモリ	1GB
Projector	Epson ELP-703	1024×768pixel
Camera	Teli CS5850	640×480pixel

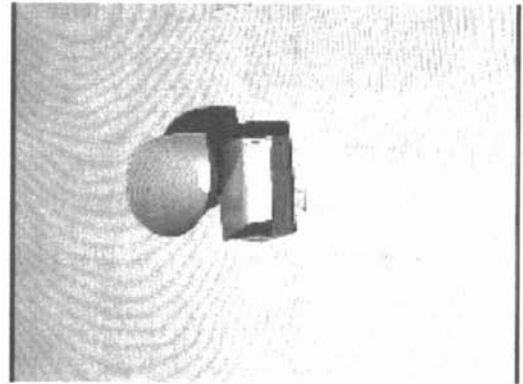


図 11: 計測対象シーン 1.

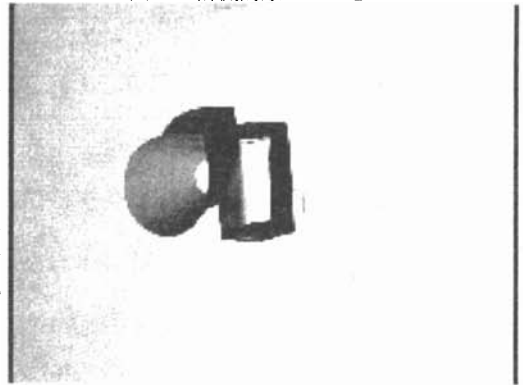


図 12: ライトトランスポートの Direct 成分.

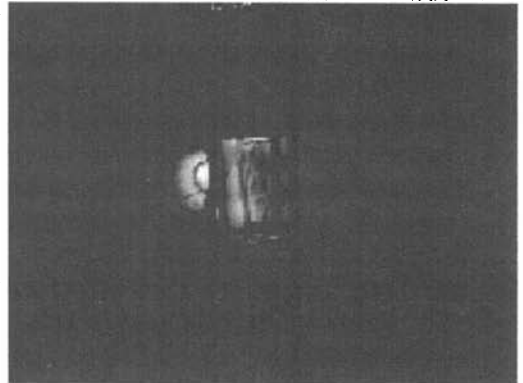


図 13: ライトトランスポートの Indirect 成分.

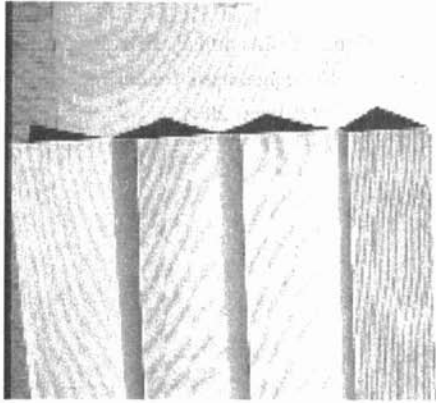


図 14: 計測対象シーン 2.

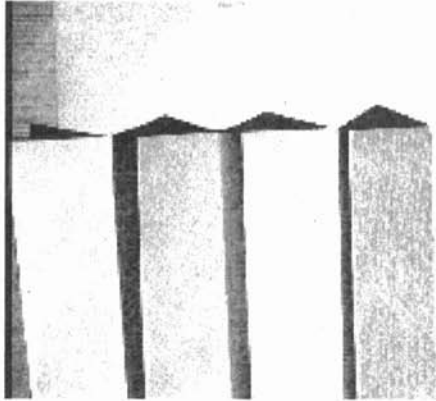


図 15: ライトトランスポートの Direct 成分.

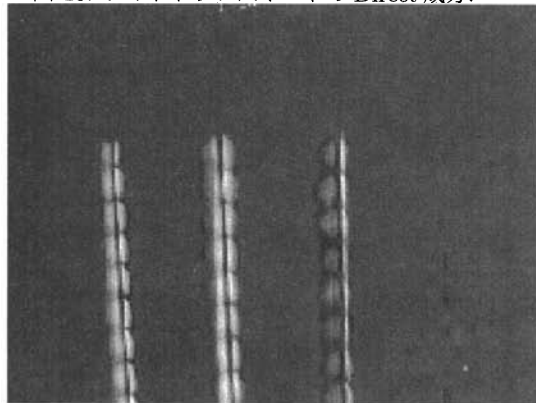


図 16: ライトトランスポートの Indirect 成分.

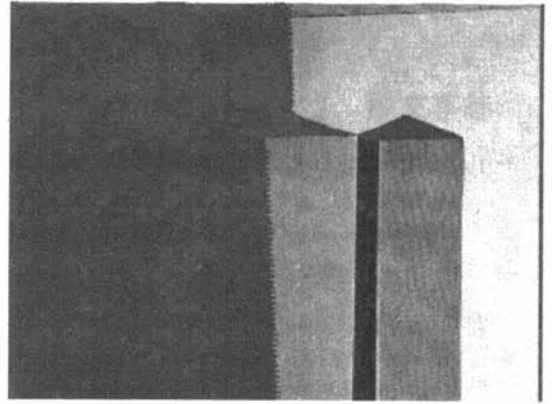


図 17: 照明効果シミュレーション 1.

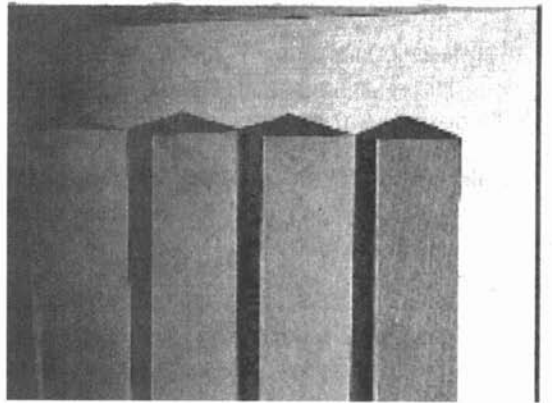


図 18: 照明効果シミュレーション 2.

5 結論

本論文では光の入出力関係を記述する方法のひとつであるライトトランスポートの計測に関する手法を提案した。ライトトランスポートの計測として BruteForce 法での計測はシンプルであるが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 Direct/Indirect 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、4章に示したように良好な結果を得ることができたが改善の余地のある点もある。Indirect 成分の計測結果には切れ目があらわれブロックパターンのようにになっている。また、ごく小さな値に関しては観測できず黒く落ちてしまっている部分もある。これらを改善するために、今後投影するパターンを

検討しなければならない。

参考文献

- [1] Sen P, Chen B, Garg G, Marscher S, Horowitz M, Levoy M, and Lesch H, "Dual Photography," Transactions on Graphics, vol.24, no.3, pp.745-755, 2005.
- [2] Nayar S, Krichnan G, Grossberg M, and Raskar R, "Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination," Transactions on Graphics, vol.25, no.3, pp.935-943, 2006.
- [3] Seitz S, Matsushita Y, and Kutulakos K, "A Theory of Inverse Light Transport," In Proceedings of ICCV, vol.2, pp.1440-1447, 2005.
- [4] Kajiya J T, "The Rendering Equation," ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol.20, no.4, pp.143-150, 1986
- [5] T.Mita, S.Hiura, H.Kato and S.Inokuchi "Strategical tracking of polyhedral objects by reactive change of projection pattern - reactive range finder -, " Proceedings of third ACCV, pp495-502, 1998.
- [6] 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本化", 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.
- [7] 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, June 2005.
- [8] Y. Mukaigawa, T.Kakinuma, and Y.Ohta. A fast compensation method of inter-reflection for pattern projection onto a non-planar surface. Proc. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PRO-CAMS2006), pages 9-10, 2006.
- [9] C. Zhang and T. Chen. Generalized plenoptic sampling. Technical Report AMP01-06, Carnegie Mellon University, 2001.
- [10] H. Y. Shum, Y. Li, and S. B. Kang. An introduction to imagebased rendering. Kluwer Academic Publishers, 2004.