

時間分解ラジオシティを用いた反射率と形状の整合性評価

生坂 優太^{1,a)} 櫛田 貴弘¹ 田中 賢一郎^{2,1} 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

概要

拡散相互反射が起きるシーンにおいて、その形状が与えられると、ラジオシティの逆問題として反射率を推定することができる。しかし、与えられた形状が誤っていた場合、従来のラジオシティでは誤った反射率が推定され、誤ったことを知る手掛かりがなかった。本研究では、ラジオシティにピコ秒単位での時間変化の解析を取り入れた時間分解ラジオシティを提案する。反射率を推定する際に、誤った形状ではピコ秒単位での観測に不整合をきたすことを明らかにし、これを単一光子計測による実験で確かめた。

1. はじめに

物体表面の反射特性の推定は、照明の影響を受けない物体認識や、新たな照明下での見えの予想などに必要とされる技術であるため、コンピュータビジョン (CV) 分野では古くから取り組まれている。対象物体が完全拡散反射面であれば、推定するのは反射率のみであるため、比較的単純な問題である。しかし、完全拡散反射面であったとしても、凹面で強い相互反射が生じる場合には、その影響を考慮する必要がある。

拡散相互反射の影響を考慮し、形状と光源が所与としたときの各面の明るさを定式化したラジオシティ [2], [3] がある。その逆問題を解くことで、カメラで観測した明るさから反射率を解析的に求める手法が提案されている [1]。ここで、反射率推定に使用した形状に誤差がある場合、推定された反射率にも誤差が生じる。しかし、計算そのものは解析的に解けてしまうため、反射率に誤差が生じていたとしてもそれを知る手掛かりがなかった。

ラジオシティは各面の相互関係を考慮して整合性のとれた明るさを解析的に与えるが、光の伝播を考えた場合には光源からカメラにたどり着く経路は直接反射と相互反射では大きく異なる。普通のカメラによる観測ではこの違いは感知できないが、ピコ秒単位の光伝播を計測できる画像計測システム [4] を用いると、これらを区別することが可能となる。そこで本研究では従来のラジオシティにピコ秒単

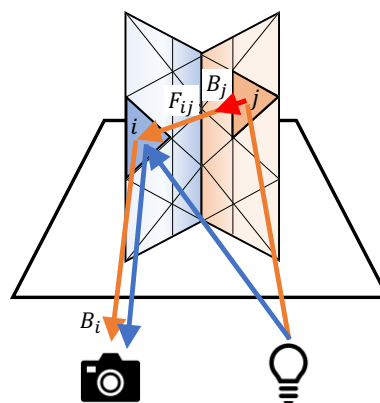


図 1 ラジオシティ

位での時間変化の概念を取り入れて拡張し、反射率の推定における整合性の定量化を試みる。

2. ラジオシティに基づく反射率推定

2.1 問題設定

本研究では、拡散反射、および拡散反射で生じる相互反射のみが観測されるシーンを取り扱う。対象物体の形状は既知であり、微小なパッチの集合として表現される。光源から各パッチが受ける照明の強さも既知である。入力カメラで撮影された 1 枚の画像であり、各パッチの反射率を求める問題となる。

2.2 ラジオシティによる拡散相互反射のモデル

ラジオシティはコンピュータグラフィックス (CG) 分野で用いられる拡散相互反射を考慮したレンダリング手法である。図 1 に示すように、光源を含めたシーン全体を細かいパッチに分け、それぞれのパッチ間での光エネルギーの受け渡しを連立方程式として解くものである。

i 番目のパッチから放出されるエネルギー B_i は次式で表現される。

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_j F_{ij} B_j \quad (1)$$

ここで、 E_i は i 番目のパッチの発光エネルギーであり、光源でなければ 0 である。 ρ_i は i 番目のパッチの反射率を示す。 F_{ij} はフォームファクタと呼ばれ、 i 番目と j 番目のパッチ間のエネルギーの伝播の割合を示す。フォームファ

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

² 立命館大学

^{a)} ikusaka.yuta.iw0@is.naist.jp

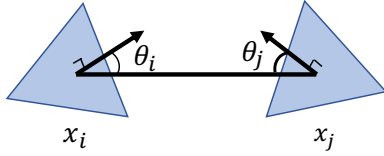


図 2 フォームファクタ

クタは形状のみに依存し、様々なモデルが提案されているが、本研究では次式に従うものとする。

$$F_{ij} = \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\|x_i - x_j\|_2^2} \quad (2)$$

ここで、図 2 に示すように、 θ は両パッチを結ぶ方向と法線のなす角度、 x はパッチの位置を示す。

2.3 反射率の推定

CG のためにラジオシティを用いる場合、所与の光源、形状、反射率に対し、式 (1) によって拡散相互反射の強度を求める。一方、シーンの反射率を求める場合には、カメラで観測した画像の明るさから、ラジオシティの逆問題を解く。 i 番目のパッチの反射率 ρ_i は次式で解析的に求められる。

$$\rho_i = \frac{B_i - E_i}{\sum_j F_{ij} B_j} \quad (3)$$

ここで、与えられた形状に誤差がある場合、フォームファクタも不正確になり、結果として反射率も正しく求まらない。しかし、推定された反射率が正しいのかどうかを知る手掛かりがない。

3. 時間分解ラジオシティ

本研究では、従来のラジオシティにピコ秒単位での時間変化を取り入れて拡張した時間分解ラジオシティを提案する。これにより、反射率と形状に不整合が生じている場合に、それを定量的に知ることが可能となる。

3.1 単一光子検出器を用いた時間分解計測

通常のカメラでは光の伝播の様子を直接計測することはできない。しかし、近年では、単一光子検出器である SPAD (Single Photon Avalanche Diode) と高速な時間計測が可能な TDC (Time to Digital Converter) を組み合わせ、ピコ秒単位の光の伝播を直接計測するイメージング手法が利用できるようになってきた。現在の技術では、光源から発せられた光がシーン中で反射を繰り返しセンサで計測されるまでの過程を、光が数ミリ単位で進む様子として捉えることが可能である。

レーザ光源から放たれたパルス光を SPAD で観測した場合、SPAD はポアソン分布に従って、確率的なタイミングで光子を検出する。これを一定の周期で何度も繰り返すことにより、元のパルス光の形を表したヒストグラムを観測することができる。このヒストグラムのビン幅はピコ秒単

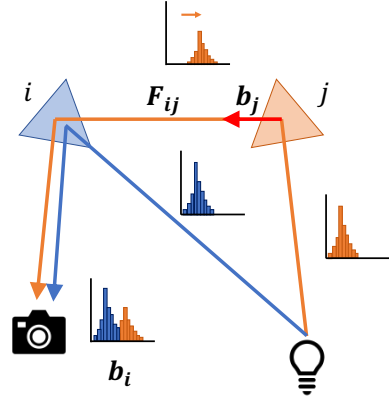


図 3 時間分解ラジオシティ

位の時間、度数は検出した光子の数となる。光子の数を明るさに読み替えることで、SPAD では時間的な明るさの変化を捉えることができる。

3.2 ラジオシティの時間拡張

従来のラジオシティは各面の明るさの時間的な変化を考慮していない。本研究では、光の時間分解計測に基づいて、従来のラジオシティを時間方向に拡張する。各パッチから放出されるエネルギーは時間的に変化していく。 i 番目のパッチで観測される光子ヒストグラムをベクトル b_i で表現する。光源から発せられるエネルギーもベクトル e_i で表現する。また、フォームファクタも光が進む距離に応じた時間遅れを考慮しなければならないため、次式のようにフォームファクタ行列 F_{ij} で表現する。

$$F_{ij} = F_{ij} D_{ij} \quad (4)$$

ここで、 D_{ij} は遅延行列であり、単位行列の対角成分を遅延のビン数だけ下にずらした要素を持つ。例えば、ヒストグラムの 1 つのビン数に対応した遅延を表現する場合には次式のようになる。

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (5)$$

フォームファクタ行列は形状が既知であれば容易に求めることができる。これらを用いると、時間分解ラジオシティは次式で表現される。

$$b_i = e_i + \rho_i \sum_j F_{ij} b_j \quad (6)$$

なお、式 (1) と比較すると、エネルギーの伝播は時間方向に拡張されているが、反射率は時間的に変化しないためスカラーのままである。

3.3 反射率と整合性の推定

時間分解ラジオシティでも、2.3 節と同様に次式のように逆問題として反射率 ρ_i を求めることができる。

$$\mathbf{b}_i - \mathbf{e}_i = \rho_i \sum_j \mathbf{F}_{ij} \mathbf{b}_j \quad (7)$$

この式は式 (7) の両辺のベクトルが平行になることを意味するが、実際にはそうはならないこともある。最大の要因はフォームファクタ行列の計算に用いた形状に誤りがある場合である。計測誤差への対応として、例えば最小二乗法によって次式の通り反射率の推定値 $\hat{\rho}_i$ を求めることができる。

$$\hat{\rho}_i = \arg \min_{\rho} \left\| (\mathbf{b}_i - \mathbf{e}_i) - \rho \left(\sum_j \mathbf{F}_{ij} \mathbf{b}_j \right) \right\|_2^2 \quad (8)$$

本論文ではさらに、この誤差を以ってフォームファクタ行列と時間分解計測の整合性を評価することを提案する。評価指標として、 i 番目のパッチに対する整合性 R_i を次式のように両ベクトルのなす角の余弦で定義する。

$$R_i = \frac{(\mathbf{b}_i - \mathbf{e}_i)^\top (\sum_j \mathbf{F}_{ij} \mathbf{b}_j)}{\|\mathbf{b}_i - \mathbf{e}_i\| \left\| \sum_j \mathbf{F}_{ij} \mathbf{b}_j \right\|} \quad (9)$$

このような整合性の定量化は、エネルギー伝播を時間的に拡張したことで、計測が画素値というスカラーから時間変化というベクトルに高次元化したことによって実現できたことがわかる。

4. 実験

提案手法により反射率と形状の整合性を評価できることを確認するために、実験環境での実験を行った。

4.1 実験環境

実験環境を図 4 に示す。現在、高解像度の SPAD カメラはセンサメーカーが開発が進められているが、市販品として容易に入手できるものではないため、本研究では単一の SPAD センサとガルバノスキャナを組み合わせることで時間分解イメージングを行った。SPAD と TDC を内蔵したタイムコントローラにはそれぞれ ID Quantique 社製 ID100 と ID900 を用いた。この二つを組み合わせることにより、13 ps の高い時間分解能で光子を検出し、光が約 4 mm ごとに進む様子を捉えることができる。ガルバノスキャナには THORLABS 社製 GCM102/M を用いた。また、パルスレーザ光源として珠電子社製 LDB-160C-639F を用い、タイムコントローラ内部のファンクションジェネレータからの外部トリガにより駆動させた。シーン全体にレーザ光を照射するため、レーザの前方には拡散板として THORLABS 社製 ED1-C50-MD を設置した。1 点に対して 1 秒間、130 ns の間隔でパルスレーザを照射し、合計

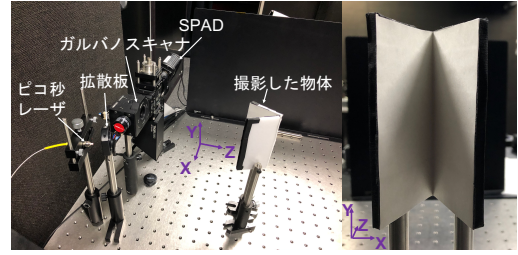


図 4 実験環境

1 s/130 ns $\approx$ 770 万回の試行を行った。このシステムでは 130 ns/13 ps = 10,000 ピンのヒストグラムを取得する。

この時間分解計測システムを用いて凹形状の物体を撮影した。相互反射を観察しやすいように、約 53.1° 開いた V 字の板に白色の紙を貼り付けた。

4.2 実験結果

4.2.1 形状測定

物体の形状は、SPAD で計測したヒストグラムのピーク時間より求めた光路長と、ガルバノスキャナの角度から求めた距離情報より与える。また、法線は求めた距離を微分することにより算出する。

SPAD により計測したヒストグラムの例を図 5 に示す。

赤点では直接反射光に遅れて相互反射光が到達し、二つのピークが計測されている。また、青点と橙点でも僅かながら二つめのピークが見られる。また、V 字の外側に位置する青点では、橙点と比較してピークの間隔が広がっている。これは、計測対象において相互反射光は主に他方の面からの反射光であり、外側に近い点では相互反射光の飛行距離が長くなるため、相互反射光も遅延して到達するからであると解釈できる。一方、緑点では二つのピークは見られない。これは、計測対象で内側に位置しているため、相互反射が到達するまでの時間が短く、直接反射光と相互反射光の二つの波形が重なったことによると考えられる。

ピークより算出された形状を図 6 に橙点で示す。また、想定される形状を赤線で示す。算出された形状は想定 V 字型とは異なっており、主に右半分で形状の誤差が大きくなっている。これは、先述の緑点のように、相互反射光の影響によって、観測波形のピーク時間が直接反射光単体に比べて遅れて検出されるため、実際の光路長よりも長く推定されてしまい、形状の推定に影響を与えたと考えられる。

4.2.2 反射率と整合性の推定

ピーク時間から推定した形状と法線を基に式 (8) によって推定した反射率を図 7(a) に示す。左半分においては反射率はほぼ一定である。一方、右半分では反射率が低くなっていることがわかる。左右の面とも同じ紙を貼り付けているため、本来はそれらの面で反射率はほぼ同じはずである。誤差の大きい形状を元にフォームファクタ行列を算出しているため、反射率を正しく求められていないと考えられる。

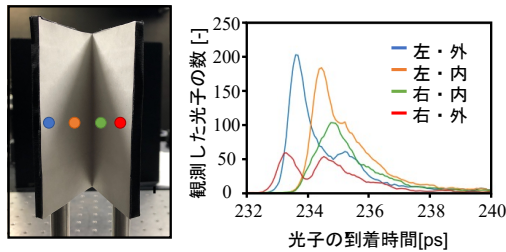


図 5 各点で取得したヒストグラム

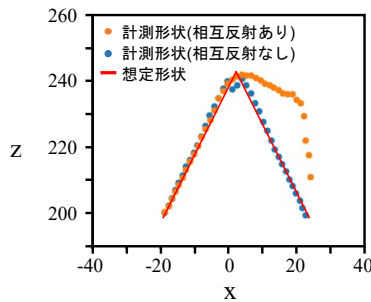


図 6 SPAD のピーク時間より算出した x-z 形状

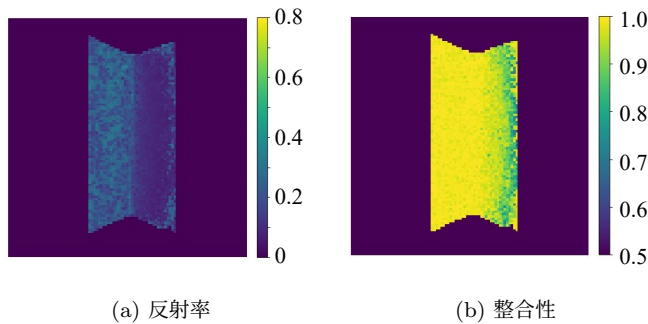


図 7 反射率と整合性

式 (9) を基に推定した整合性を図 7(b) に示す。図では右半分で整合性が低くなっており、本手法では形状の誤差が大きいくことを正しく評価できていると考えられる。

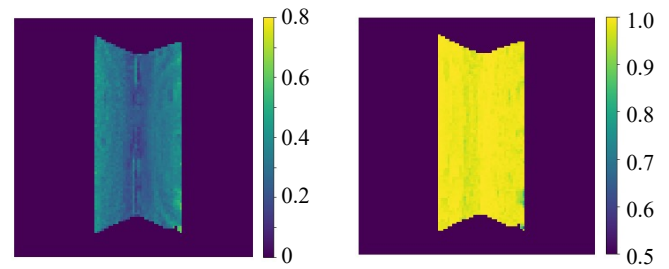
4.2.3 相互反射の影響を抑えて計測した形状を用いた場合

図 4 で用いた時間分解イメージングで精度よく形状を推定するため、相互反射の影響を抑えた計測を行った。ここでは、拡散板を用いずにレーザーで一点ずつ照射し、時間分解イメージングによってその点までの距離を計測した。

この方法で推定された形状を図 6 に青点で示す。また、式 (8)、式 (9) で求めた反射率と整合性を図 8 に示す。相互反射による影響が抑えられ、想定している V 字の形状を推定できたことがわかる。また、反射率はほぼ一様であり、整合性についても図 7 と比較して向上した。ただし、光源強度のキャリブレーションを十分に行えておらず、推定された反射率の定量評価は行えていない。これは今後の課題である。

5. 結論

本論文ではラジオシティの逆問題による反射率推定に時



(a) 反射率 (b) 整合性

図 8 正しい形状での反射率と整合性

間分解計測を導入した時間分解ラジオシティを提案した。これにより、所与の形状から得られるフォームファクタ行列と観測における整合性の定量化が可能となった。また、実験を通して整合性を評価し、その結果、形状が整合性に影響を及ぼすことを明らかにした。特に、相互反射の影響を抑えた形状では整合性の向上が見られた。今後の課題として、与えられた形状に誤りがあったとしても、整合性を基に反射率と形状を同時に最適化することが挙げられる。

時間分解計測が可能な高解像度 SPAD カメラは現時点ではまだ一般的ではないが、センサの開発は活発に進められているため、近い将来には CV 用途でも広く使われると予想される。本研究はそのような時に利用できる技術を取先行して開発したものである。ラジオシティにもとづく反射率推定は古典的な手法であるが、最先端デバイスと組み合わせることでアルゴリズムを拡張できることを示した。カメラで観測される画素値は一般に低次元の情報であるが、光子数のピコ秒単位の変化を計測することで高次元ベクトル化することができ、新しい解析手法として利用できることを示した。今後も、SPAD カメラを用いた新しい CV アルゴリズムの開発を目指す。

謝辞

本研究の一部は JST CREST JPMJCR1764, 科研費 JP20K20629 からの助成を受けた。

参考文献

- [1] Fournier, A., Gunawan, A. and Romanzin, C.: Common illumination between real and computer generated scenes (1993).
- [2] Goral, C. M., Torrance, K. E., Greenberg, D. P. and Battaile, B.: Modeling the Interaction of Light between Diffuse Surfaces, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol. 18, No. 3, p. 213-222 (1984).
- [3] Nishita, T. and Nakamae, E.: Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Taking Account of Shadows and Interreflection, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol. 19, No. 3, p. 23-30 (1985).
- [4] 北島大夢, 北野和哉, 榎田貴弘, 田中賢一郎, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博: 単一光子検出器を用いた光の高時間分解能計測による材質の分類, 情報処理学会研究報告, Vol. CVIM-219, No. 10, pp. 1-6 (2019).