

町田 貴史¹
Machida Takashi

横矢 直和²
Naokazu Yokoya

1. はじめに

近年、複合現実感の分野で物体の見え方に対する光学的な特性を忠実に再現するための手法が研究されている[1, 3, 4, 5, 6]。これらの研究では、物体の幾何形状と表面の色情報から表面反射特性の推定を行っている。なかでも屋内のシーンに対して物体間の相互反射を考慮することで、より写実的な表現を行うことが重要視されている。しかし、物体表面は様々な反射特性を有しており、非一様な物体表面反射特性を推定する必要がある。[1]では物体の表面反射特性を密に観測することにより、非一様な表面反射特性を有する物体に対してその特性を密に推定することを行った。しかし、物体自身の相互反射が考慮されていないため、複雑な形状を有する物体の場合、忠実な推定を行うことが困難となる。

そこで本論文では、文献[1]と同様に距離画像と表面テクスチャ画像の同時計測が可能な全周計測レンジファインダを使用し、物体計測時の最適な光源位置を決定することにより各反射成分を密に観測する。また、ラジオシティに基づいて相互反射を考慮した物体表面反射特性の推定を行う。これにより、不均一な表面反射特性を持つ物体に対して、物体面上のほぼ全点で相互反射を考慮した厳密な物体表面反射特性の推定が可能となる。

2. ラジオシティ法に基づく表面反射係数の推定

2.1. 物体の計測と最適な光源位置選択

提案手法の処理の流れを図1に示す。処理は3次元画像計測(図1中A, C)、光源位置の選択(図1中B)、表面反射特性の推定(図1中D)に分けられる。各処理の概要は次のとおりである。

まず、図2(a)の全周計測レンジファインダ(Cyberware3030RGB)を3次元画像計測に用いる。この装置は対象物体の周りを回転することにより物体の形状と表面のテクスチャ画像を同時に得ることが可能である。

次に最適な光源位置の選択では、予め計測した物体の形状をもとに、図2(b)のように位置が既知の60個の光源設置候補位置の中から光源位置を選択する。この処理により、物体表面の各反射成分を密に観測することが可能となる。光源設置候補位置は全周計測レンジファインダの周囲に格子状に用意する。光源は装置に固定されるため、物体計測時は装置と同様に回転する。また、光源設置候補位置は縦方向に5個、横方向に12個、合計60個の位置を上下左右5cm間隔で用意する。このとき、装置の仮想カメラと各光源設置候補位置の位置関係は一定に保たれる。

最後に決定された m 個の光源設置候補位置に対して、得

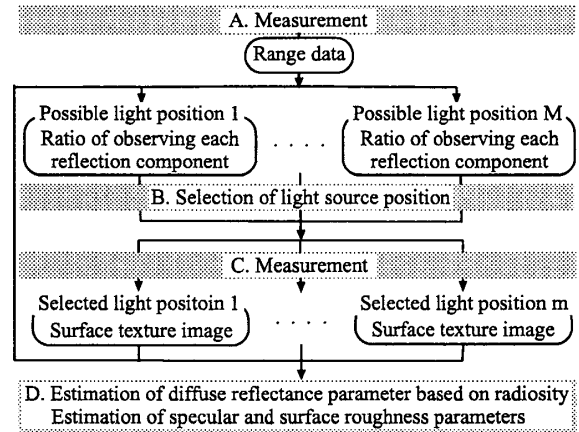
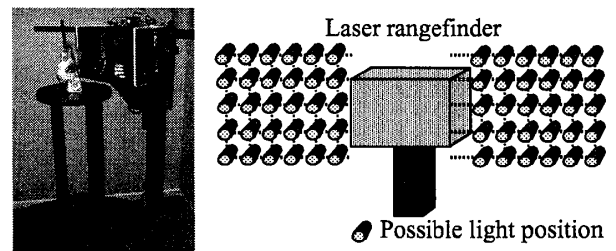


図1: 物体の表面反射係数推定における処理手順



(a) Appearance of 3D Digitizer (b) Multiple possible light source positions

図2: 3次元画像計測装置

られた複数の全周テクスチャ画像内の同じ位置の画素について反射特性を推定する。以降では、決定された光源位置 $p(1 \leq p \leq m)$ で計測されたテクスチャ画像を $I_p = (i_{p1}, \dots, i_{pn})$ (i_{pk} は k 番目の画素の輝度値, n は総画素数)とすると、この画像内の k 番目の画素 $i_{p,k}$ について、拡散反射成分のみを含む画素を $i_{p,diff,k}$ 、強い鏡面反射成分を含む画素を $i_{p,both,k}$ とする。ここで、上記のどちらにも当てはまらない画素が存在するが、そのような画素は推定には用いられない。

2.2. ラジオシティに基づく拡散反射係数の推定

拡散反射成分は物体面上で全方向に均一に反射するため、相互反射は拡散反射成分の影響が大きいと考え、提案手法では鏡面反射成分による相互反射の影響はないものと仮定する。本稿で使用するラジオシティの式[6]を以下に示す。

$$B_u = E_u + P_{du} \sum_{v=1}^{\alpha} B_v F_{uv} \quad (1)$$

ここで、 $B_u, B_v(1 \leq u, v \leq \alpha)$, α は物体を表現する総パッチ数はそれぞれ u 番目と v 番目のパッチ(四角形パッ

¹大阪大学 サイバーメディアセンター

¹Cybermedia Center, Osaka University

²奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

²Nara Institute of Science and Technology (NAIST)

チ) のラジオシティ, F_{uv} はパッチ u とパッチ v のフォームファクタと呼ばれ, 両パッチ間のラジオシティの割合となる. この値はパッチの面積, 距離, 遮蔽パッチの有無などが考慮されている. E_u はパッチ u に影響を及ぼす環境光である. ラジオシティ法は閉じた空間内でのエネルギー保存則に基づいているため, 物体を取り巻く環境のモデル化が必要となる. しかし, 先にも述べたように, 本研究では暗室で物体計測を行うため, 環境光が及ぼす2次反射成分はないと仮定する. P_{du} はパッチ u の拡散反射係数を表す.

提案手法では物体の形状を全周計測レンジファインダで計測するため, パッチ u, v のフォームファクタ F_{uv} は既知である. また, 計測によって得られる距離画像と表面テクスチャ画像は画素単位で1対1に対応しているため, パッチ u に対応するラジオシティ B_u は, 対応するテクスチャ画像内の画素の輝度値をもとに計算される. そこで, 式(1)を用いることによりパッチ u の拡散反射係数 P_{du} が推定される. 最終的には, 隣接するパッチの拡散反射係数の平均を物体面上の各点の拡散反射係数とする.

2.3. 鏡面反射係数と表面粗さ係数の推定

鏡面反射係数と表面粗さ係数は以下の Torrance-Sparrow モデル [2] の鏡面反射成分の式を用いて推定する.

$$e = \frac{Y}{C^2} \left\{ P_d \cos \theta_d + P_s \frac{1}{\cos \theta_v} \exp\left(-\frac{\cos \theta_r}{2\sigma^2}\right) \right\} \quad (2)$$

式(2)を用いて鏡面反射係数 P_s と表面粗さ係数 σ を推定するためには, 少なくとも2つの異なる光源位置 p, q で強い鏡面反射成分を観測した画素 $i_{p,both,k}, i_{q,both,k}$ が必要となる. そこで, まず2つの異なる光源位置 p, q で得られた画像 I_p, I_q において, $i_{p,both,k}$ と $i_{q,both,k}$ から先に推定した拡散反射係数 P_d を用いて, ラジオシティに基づき相互反射を考慮した拡散反射成分を求める. ここで, 式(1)の拡散反射係数は式(2)の拡散反射成分の項をもとに予めスケールされている. 次に, 抽出された鏡面反射成分と観測時の N_k, L_{pk}, V_k を式(2)に代入することにより, 鏡面反射係数 P_s と表面粗さ係数 σ を求める.

3. 実験

提案手法の有効性を確認するために, 図3(a), (e)の計測物体について反射係数の推定実験を行った. 物体A, 物体Bともに複雑な形状を有し, 部分的に鏡面反射のある物体である.

表1は物体A, Bの各物体における両反射成分の観測割合と選択光源位置数を表している. ここで, 選択光源位置数に関して表中の括弧内の数は拡散反射成分の密な観測に要した数である. 各物体において, 全周計測レンジファインダの周囲に用意した60個の光源位置をすべて使用せずとも大幅に少ないテクスチャ画像により反射係数が密に求まることが確認できる. この結果から各反射成分ともにあらかじめ用意した光源設置位置すべてを用いずとも, 物体面上の大部分で観測可能であることがわかる.

図3(b)~(d), (f)~(h)はそれぞれ物体A, Bに対して推定した各反射パラメータをもとに, 仮想光源を用いてレンダリングを行った例である. 仮想光源は固定されており, 物体の左, 正面, 右と向きを変えている. なお, レンダリング処理はTorrance-Sparrowモデルを用いた1次反射のみのレンダリングを施している. 両物体ともに仮想光源に

表1: 各反射成分の観測割合

物体	物体 A	物体 B
選択光源数	9(3)	13(5)
拡散反射成分の観測割合	100.0%	100.0%
鏡面反射成分の観測割合	94.7%	85.9%

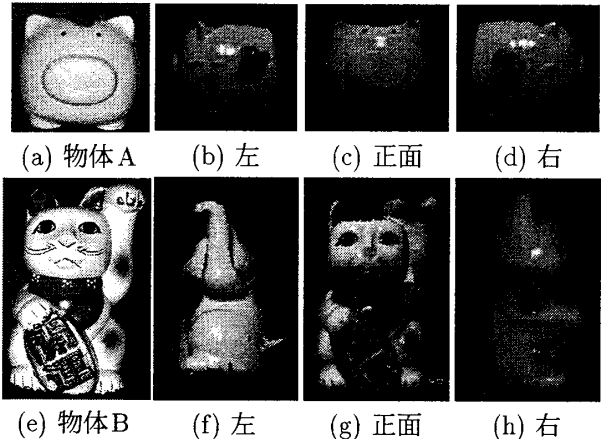


図3: Torrance-Sparrowモデルによるレンダリング結果

よる照明の影響を忠実に表現している. しかしながら, 物体Bでは複雑な形状を有しているため, 鏡面反射成分による相互反射の影響を受けている部分があり, より忠実な反射特性の推定には鏡面反射成分による相互反射の影響を除去することが必要であると考えられる.

4. あとがき

本論文では, 各反射成分が密に観測可能となるように物体計測時の最適光源位置を複数決定し, 複数のテクスチャ情報と距離画像から, ラジオシティに基づき拡散反射成分についての相互反射を考慮した反射特性の推定手法を提案した. 本手法により, 複雑な形状を有する物体や部分的に異なる表面反射特性をもつ物体を仮想化した場合に仮想環境内で陰影矛盾のない忠実な物体表現が可能となる.

参考文献

- [1] 町田, 竹村, 横矢: “複数の照明条件の組合せによる物体の表面反射特性の密な推定”, 信学論 (D-II), Vol. J84-D-II, No.8, pp.1873-1881, 2001.
- [2] K. E. Torrance and E. M. Sparrow: “Theory for Off-specular Reflection from Roughened Surfaces,” Jour. Optical Society of America, Vol. 57, pp. 1105-1114, 1967.
- [3] G. Drettakis, L. Robert and S. Bougnoux: “Interactive Common Illumination for Computer Augmented reality,” Eurographics Rendering Workshop 1997, pp 45-56, June 1997.
- [4] S. Boivin and A. Gagalowicz: “Image-Based Rendering of Diffuse, Specular and Glossy Surfaces from a Single Image,” Proc. SIGGRAPH 2001, pp 107-116, 2001.
- [5] Y. Yu and J. Malik: “Recovering Photometric Properties of Architectural Scenes from Photographs,” Proc. SIGGRAPH '98, pp. 207-217, 1998.
- [6] Y. Yu, P. Debevec, J. Malik, and T. Hawkins: “Inverse Global Illumination: Recovering Reflectance Models of Real Scenes from Photographs,” Proc. SIGGRAPH '99, pp.215-227, 1999.