

ライトフィールドカメラを用いた物体の形状と反射率推定

Shape and reflectance estimation from a light field



長原 一 (Hajime NAGAHARA, Dr. Eng.)

大阪大学 データビリティフロンティア機構 教授

(Professor, Institute for Datability Science, Osaka University)

IEEE 情報処理学会 電子情報通信学会 映像メディア学会 日本ロボット学会

受賞：ACM VRST2003 Honorable Mention Award 2012 年情報処理学会長尾真記念特別賞 ICCP2016 Best Paper Runners-up Award 2016 年度 画像センシング技術研究会高木賞 など

研究専門分野：コンピュータショナルフォトグラフ コンピュータビジョン

あらまし 画像からの一般的な形状計測手法は、物体上の点の色や輝度が変化しないランバーシアン反射面であることが仮定されている。しかしながら、ランバーシアン反射は理想的な反射モデルであり、一般的な物体のほとんどはこれに従わない。たとえば、金属やプラスチックなどスムーズな面の物体は強い鏡面反射を持ち、光源とカメラの方向に大きく依存して見え方が変化する。本研究では、ライトフィールド画像からの物体形状と反射率推定手法について提案する。提案手法では、自然照明環境化においてライトフィールドカメラと全天球カメラからワンショットで得られる画像から物体形状と反射率を測定できる。これにより、従来のステレオ法などの苦手であった金属やプラスチックなどの拡散反射が仮定できない物体に適用することで、3次元計測の適用範囲を広げることができる。

1. 研究目的・狙い

コンピュータビジョンにおいて、画像からの物体の3次元形状計測は古くからのテーマであり、多くの形状推定手法が提案されてきた。典型的な3次元計測手法であるステレオ法では、2画像間の視差を画像中の対応点から求める必要がある。画像間の対応点を求めるには、画像中で物体上での対応点の見え方が同じであ

る必要がある。すなわち、見る方向が変わっても物体上の点の色や輝度が変化しないランバーシアン反射面であることが仮定されている。しかしながら、ランバーシアン反射は理想的な反射モデルであり、一般的な物体のほとんどはこれに従わない。たとえば、金属やプラスチックなどスムーズな面の物体は強い鏡面反射を持ち、光源とカメラの方向に大きく依存して見え方が変化する。なかには、サテンやシルク生地のように、見る方向に大きく依存して反射色や輝度が変化するような材質も世の中には多く存在する。一般的なステレオマッチングでは、このような見えの変化の影響を避けるために、エッジやコーナー、テクスチャなどのパターンを利用して対応点を推定している。しかし、そもそも物体表面にこのようなパターンがない物体は、計測できないという問題があった。図1の左に、一般的なステレオビジョンが要求するランバーシアン反射面とテクスチャを持つ物体の画像、図1の右に、異方向性反射を持つ金属でできた物体の画像を示した。つまり、従来法は、図1左に示すような不自然な対象でなければ3次元復元が安定に求まらず、同じ形状であっても、図1の右の様な金属でできた一般的な対象には適用出来なかった。この様な手法の制限がコンピュータビジョンの応用範囲を制限して、一般的に利用できない一因となってきた。

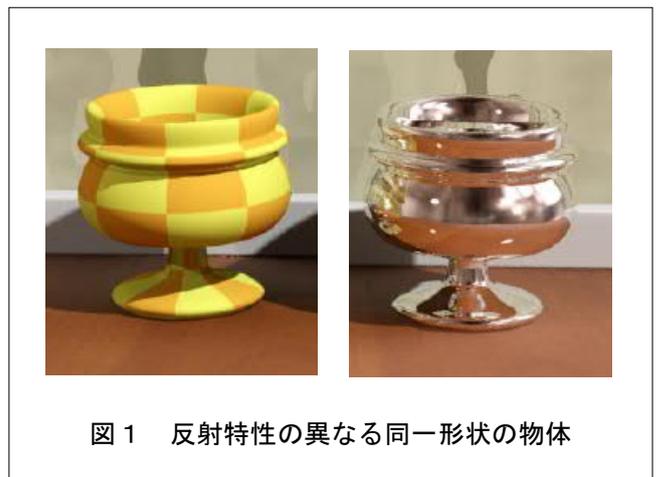


図1 反射特性の異なる同一形状の物体

本研究では、このような従来のランバーシアン反射を仮定またはテクスチャが対応点として必要であった

ライトフィールドカメラを用いた物体の形状と反射率推定

Shape and reflectance estimation from a light field

画像による形状推定の問題を解決し、金属などの強い反射をもつテクスチャのない物体の画像からの形状計測を可能にする手法を提案する。提案手法は、これまで取り扱えなかった物体を対象にする点がチャレンジングで、計測できる適用物体を広げることから実用性も高い。具体的には、入力としてライトフィールドカメラを用いる。ライトフィールドカメラは、光線空間（ライドフィールド）を撮影出来るカメラで、ワンショットで多視点の画像を撮影できる。提案手法では、この多眼画像情報を用いて対象物体の形状と反射率分布（BRDF：Bidirectional Reflectance Distribution Function）を同時推定する。本手法では、ステレオ対応と反射率から想定される見かけの変化の対応が矛盾無く一貫するような、形状（奥行き視差と法線方向）と反射率を冗長な視点情報から同時推定しようとするところが一般的なステレオと異なる。これにより、推定された反射率自体が特徴点として働くため、テクスチャが全くない物体においても密な形状を推定できる。特徴点探索とステレオ手法のいちばんの不安定要因を解決できることから、この手法により一般環境下において、より安定にカメラによる3次元計測が可能となる。

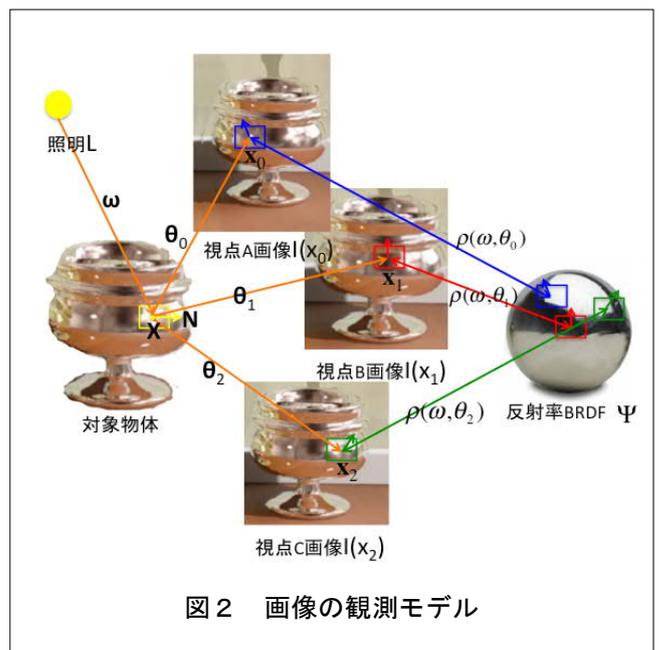
2. 関連研究

物体形状と反射率および照明条件が既知であれば、コンピュータグラフィックス（CG）を用いて、その物体の見かけをシミュレーションにより再現することができる。これをフォワードレンダリングと呼ぶ。これに対して、本研究が対象とする対象の見かけから逆に物体形状や反射率、照明環境を復元する手法は、インバースレンダリング[1]と呼ばれる。理想的なインバースレンダリングは、単一画像から形状と反射率分布、照明の同時推定することであるが、これは劣決定な問題であり解決が容易でないことから、このうちの幾つかを推定するのが一般的である。例えば、反射特性をランバーシアン反射と仮定して既知の照明下で形状を求める研究[2][3]や、未知照明下で形状を求める研究[4]などがある。逆に、形状を既知と仮定して画像から反射率分布と照明を求める研究[5]も提案されている。単一画像ではなく、多視点画像からインバースレ

ンダリングを解く手法も提案されている。Oxholmら[6]は、既知の自然照明下で複数視点で計測された画像から物体の形状と反射率分布を推定する手法を提案している。しかしながら、このような多数視点を計測するには、計測時間がかかるという問題があった。本研究では、入力装置としてワンショットで多視点画像を撮影可能なライトフィールドカメラと、照明を計測するために全天球カメラを組み合わせることで、ワンショット撮影された画像から物体形状と反射率分布を同時推定する。

3. 研究方法と実験結果

図2に、物体が多視点画像として得られる観測モデルを示す。



環境中の任意の照明 L から出射された光線は、物体上の点 X で反射され、画像上の点 x_i の輝度値 $I(x_i)$ として観測される。このときの輝度値 $I(x_i)$ は、視点毎に異なる反射角 θ_i の光線を観測していることから、画像中での見えは視点毎に異なって観測されることになる。この過程は式(1)のように表される。なぜなら、対象物体は反射率分布 Ψ を持ち、その反射特性は $\rho(\omega, \theta)$ で表されるように、反射角 θ_i に依存した特性を持つためである。

ライトフィールドカメラを用いた物体の形状と反射率推定

Shape and reflectance estimation from a light field

$$\hat{I}(\mathbf{x}_i) = \int \rho(\omega, \theta_i; \Psi) \mathbf{L}(\omega) \max(0, \mathbf{N} \cdot \omega) d\omega \quad (1)$$

もし、反射率分布 Ψ が既知であれば、視点に依存した $I(\mathbf{x}_i)$ は反射率分布より予想できるため、物体表面にテクスチャがなくとも、その推定輝度から対応点を求めることができる。反対に、複数視点間の対応関係が既知であれば、 $I(\mathbf{x}_i)$ 間の関係から反射率分布 Ψ を求めることができる。本研究では、すなわち、ステレオの対応推定と反射率分布推定を同時に行うところに新しさがある。具体的には、式(2)で表される推定輝度値と、観測輝度値の差を最小化するように各ピクセルに対応する物体の奥行きと、法線ベクトル、物体全体の反射率分布を求める。

$$d(\mathbf{x}_0) = \sum_i \left\| I(\mathbf{x}_i) - \hat{I}(\mathbf{x}_i) \right\|^2 \quad (2)$$

具体的には、図5及び図6におけるレンダリング画像を計測画像に近づけるように形状と反射率分布を推定することに対応する。これにより、鏡面反射を持つテクスチャレスの物体形状と反射率分布と同時を求めることができる。実際には、物体形状や反射特性のなめらかさを事前確率、式(2)を尤度関数として、事後確率最大化推定 (MAP 推定) 手法を用いてこの問題を解いた。詳しいアルゴリズムや手法に関しては、文献[7]を参照されたい。

実験では、撮影装置として市販のライトフィールドカメラ (Lytro Illum) と全天球カメラ (Rico Theta) を用いた。図3と図4に、実験に使用したライトフィールド画像および全天球画像を例として示した。図3に示す様に、ライトフィールドカメラではワンショットで多視点の画像を撮影することができる。また、図4に示す様に、全天球カメラでは環境全体の輝度を一枚の画像として取得できる。これら2種類の入力画像から本手法を適用することで、図5に示す様に、物体の形状を法線マップとデプスマップとして、反射率分布をBRDFとして取得することができた。図5に、撮影画像と推定された形状と反射率を用いたCGレンダリング画像を示している。本手法は、これらの撮影画像とレンダリング画像の誤差を最小化する推定物体形状と反射率を推定していることから、これらの画像は収

束時にほとんど同じ見かけとなっていることが確認できる。また、本手法では、一般的なインバースレンダリングとは異なり、法線マップに加えてデプスマップも推定できる。これは、物体のシェーディングのみならず、ライトフィールド画像の多視点がステレオとして利用しているためである。これにより、一般的に法線マップを積分して得られるデプスマップに対して、形状復元の安定性の向上や曖昧性を排除できるという利点がある。さらに図6に、同様に反射率分布の異なる物体についての適用結果についても示した。これから、図5の様な反射特性がマットな物体のみならず、スペキュラ反射の様な鋭い反射特性を持つ物体においても、図6に示す様に復元できていることが示された。

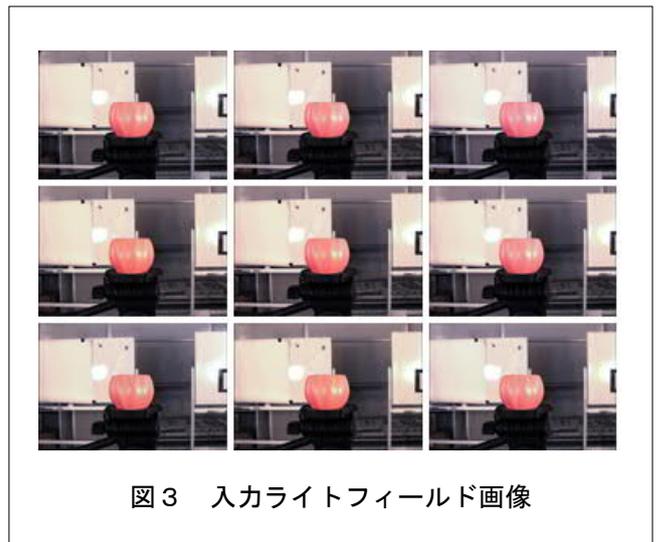


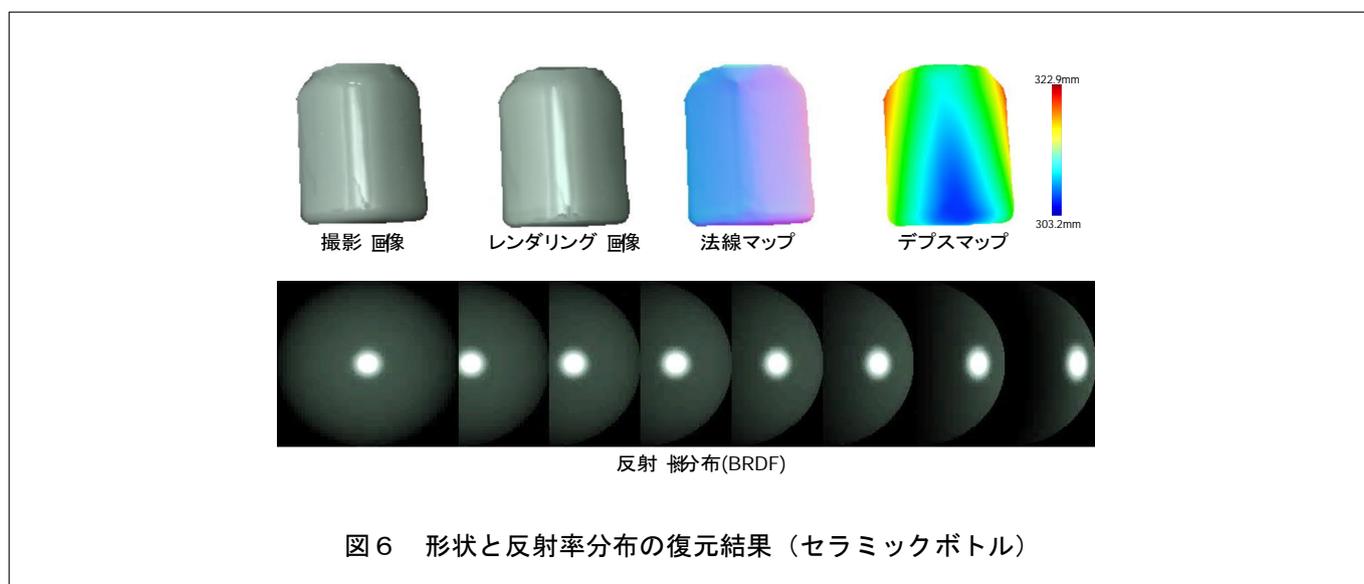
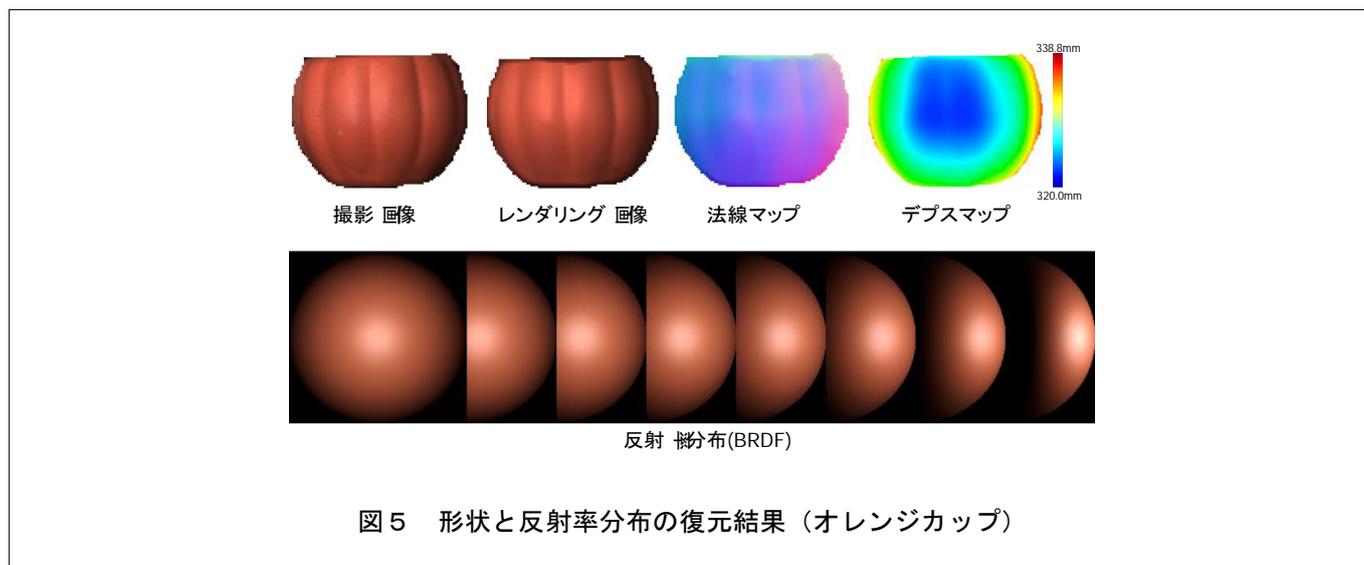
図3 入力ライトフィールド画像



図4 入力全天球画像

ライトフィールドカメラを用いた物体の形状と反射率推定

Shape and reflectance estimation from a light field



4. 結論と今後の展望

本研究では、ライトフィールド画像からの物体形状と反射率分布推定手法について提案した。本手法では、自然照明環境化において、ライトフィールドカメラと全天球カメラからワンショットで得られる画像から物体形状と反射率分布を測定できる。これにより、従来のステレオ法などの苦手であった金属やプラスチックなどの拡散反射が仮定できない物体に適用することで、3次元計測の適用範囲を広げることができる。例えば、コピーやファックスの様にライトフィールドカメラで

撮影して、3Dプリンタで物体をコピーしたり、送ったりするといった3次元情報の気軽な日常用途をさらに広げる。また、従来の反射率分布測定は、暗室環境などで特殊機材を用いて時間がかかっていたのに対して、本手法では、自然環境下においてワンショットで簡便な撮影により実現できる。このことから、フィールドでの反射率分布測定が可能となることから、文化財や美術品などの計測などの人文科学的応用や工業製品の質感計測など、幅広い応用に用いることができると期待する。

ライトフィールドカメラを用いた物体の形状と反射率推定

Shape and reflectance estimation from a light field

参考文献

- [1] Gustavo Patow and Xavier Pueyo. A Survey of Inverse Rendering Problems. *Computer Graphics Forum*, 22(4):663–687, 2003. ISSN 01677055. doi: 10.1111/j.1467-8659.2003.00716.x.
- [2] Robert J. Woodham. Photometric Method For Determining Surface Orientation From Multiple Images. *Optical Engineering*, 19(1), 1980.
- [3] George Vogiatzis and Roberto Cipolla. Multiview Photometric Stereo. *PAMI*, 30(3):548–554, 2008.
- [4] Amael Delaunoy and Marc Pollefeys. Photometric Bundle Adjustment for Dense Multi-View 3D Modeling. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1486–1492, 2014. ISSN 10636919. doi: 10.1109/CVPR.2014.193.
- [5] Stephen Lombardi and Ko Nishino. Reflectance and Illumination Recovery in the Wild. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 38(1):129–141, 2016. ISSN0162-8828. doi: 10.1109/TPAMI.2015.2430318.
- [6] Geoffrey Oxholm, Ko Nishino. Multiview Shape and Reflectance from Natural Illumination. *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.2163-2170, 2014.
- [7] Thanh Trung Ngo, Hajime Nagahara, Ko Nishino, Rin-ichiro Taniguchi, Yasushi Yagi. Reflectance and Shape Estimation with a Light Field Camera under Natural Illumination. *28th British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2017.

この研究は、平成26年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成27～28年度に実施されたものです。