

# 屋外環境下における表面反射特性の計測手法

学籍番号 90182149 佐藤(宏)研究室 三好裕樹

## 1. はじめに

近年、遺跡や古建築などの景観、形状などをデジタル保存するデジタルアーカイブが盛んに行われている。特に、屋外建造物の形状は 3 次元形状計測技術やレーザーダ技術の発達で容易にデジタル化できるようになってきた。しかし、屋外建造物の表面の光学特性（色、つや、質感等）のデジタル化は、主に屋外では照明環境をコントロールできないことから困難であり、これまでは限定された条件下のみでしか行われていない。特に、表面反射特性を表す BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function: 双方向反射率分布関数) を求めることは従来困難であった。

本研究では、天空および対象物体の画像から照明とそれに対応する物体反射の関係を求め、これらを球面調和展開し周波数領域での解析を行うことで、対象物体の BRDF を求める手法を提案する。

## 2. 反射特性の推定原理

天空を球面座標系( , )で表す。天空光の放射輝度を  $L_i( , )$  であらわし、物体反射の放射輝度を  $L_r( , )$  であらわす。物体の(実効)BRDFを  $f_r( , , , )$  で表すと、 $L_r, L_i$  および  $f_r$  の関係は

$$L_r(\theta, \phi) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_r(\theta, \phi, \theta', \phi') L_i(\theta', \phi') \sin \theta' d\theta' d\phi'$$

である。上式は、球面調和展開

$$\hat{f}_l^m = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} f(\theta, \phi) Y_l^m(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi$$

(ただし、 $Y_l^m(\theta, \phi)$  は球面調和関数。添え字  $l$  は周波数次数を示す)  $G$  をそれぞれ  $f_r, L_i$  の球面調和展開係数とすると、

$$L_r(\theta, \phi) = \sum_{l'} \sum_{m'} F(\theta, \phi, l', m') G(l', m')$$

とあらわすことができる。ここで、 $L_r$  と  $G$  が既知であれば、最小自乗法を用いて  $F$  を求めることができる。得られた  $F$  を元に、

$$f_r(\theta, \phi, \theta', \phi') = \sum_{l'} \sum_{m'} F(\theta, \phi, l', m') Y_{l'}^{m'}(\theta', \phi')$$

という逆球面調和変換を行うことで、元の BRDF を推定できる。

## 3. 実験と結果

本提案の有効性を検証するため、全天空画像の周波数領域での解析を行うべく、次に述べる計測システムを構築した。システムは 2 つのカメラ系からなり、一つは魚眼レンズを用いてレンズを鉛直上向きに撮影することで全天空画像を得る、これは上式の入射光  $L_i$  を表す画像と考えることができる。また、同時刻にもう一つのカメラで計測対象物体を撮影する(2 カメラ間で入射光の状況は大きく変化していないものとする)。これは反射光輝度  $L_r$  と考えられる。以上の撮影を一定時間おきに複数回行うことで、上の推定

原理で述べた最小二乗法による推定に必要な分のデータを取得する。陶器製の皿を計測対象として実験を行った。図 2 の右は以上の方法で計測した皿の反射特性を計測し 3 次の周波数成分まで計算し、逆に推定した反射特性から、元の皿の色の見えを再現したものである。



図 1. 入力用の魚眼レンズ(左)と皿(右)の画像

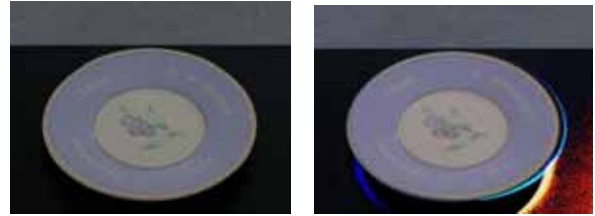


図 2. 計測した皿(左)と再現した画像(右)

## 4. 考察

本論分における実験では 3 次までの次数で反射特性推定が行われたが、図 1 より十分に色推定は出来ているといえる。これは、計測対象である皿に鏡面反射成分がほとんど含まれておらず、低次の反射成分のみで十分近似が可能であったためであると考えられる。なお、撮影回数を増やすことで、より高次の周波数成分まで反射特性の推定が可能である。

計測時に複数枚の画像から反射成分を推定し、逆に別の画像を生成するのは、計測時に撮影した画像を基底ベクトルとした固有空間上で任意の画像列を表現することに等しいといえる。ゆえに計測時の時間帯が狭いと、任意画像の生成の際、固有空間上への射影が実際と大きくかけ離れてしまう。このため、うまく色の見えの再現が出来ないと考えられる。計測は晴天下で 1 日の太陽の軌跡をカバーすれば、任意の光源状況での色の見えの再現は天候が変化しなければ可能であるが、天候が変化する場合は光源情報が時間および空間によって複雑に変化するため、BRDF 係数  $F$  が最小二乗法によって一意に求まらない可能性がある。このような場合は、BRDF 関数に特定の反射モデルを仮定し、モデルあてはめを行うことで、BRDF 係数を一意に求める手法が考えられる。

今後は提案手法を任意視点での反射特性を計測できるようになるまで拡張し、文化財等の BRDF 計測手法を実装していきたいと考えている。