

氏名	ZAR ZAR TUN
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 1201 号
学位授与年月日	令和 3 年 3 月 25 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Measuring Reflectance of Rough Surface Materials using Two Handheld Cameras (2 台のハンドヘルドカメラを用いた表面の粗い材料の反射測定)
論文審査委員	委員長 教授 小室 孝 委員 教授 島村 徹也 委員 教授 小林 貴訓 委員 准教授 安積 卓也

論文の内容の要旨

In computer graphic system, it is important to reproduce the realistic appearance that can be used in many application areas such as architecture and design, theater, cultural heritage, digital marketing, 3D computer games as well as virtual reality. An efficient way is measuring the reflectance of real materials.

On a macro scale, materials can be classified according to their material characteristics such as strength, stress, strain, and hardness. The two basic types are isotropic and anisotropic materials. Isotropic materials have homogeneous surface geometry, and identical material properties in all directions at every given point. For anisotropic materials, the texture on the material surface is rough, and it has various waving patterns, as opposed to the isotropic materials. Moreover, the anisotropic reflectance is directionally dependent as well as spatially different. And the anisotropic highlights appear on the surface in different size and shape while the isotropic highlights are the same in different directions.

The key point of this thesis is that, we propose a simple reflectance measurement apparatus. To measure the reflectance, we firstly extract the diffuse and specular reflectance components from the range of color images captured by our simple apparatus, and then, the reflectance parameters about each spatial point are iteratively estimated. The reflectance is the proportion of directly incident light, conventionally expressed as a percentage, that is reflected from a plane polished surface under specified conditions of illumination. The surface normal exits along the Z-axis at a point where the light is illuminated.

When the light is illuminated on a material surface, it exhibits a mixture of diffuse and specular reflectance. Specular reflectance is visible only where the surface normal is oriented precisely halfway between the direction of incoming light and the direction of the viewer; this is called the half-angle direction because it bisects the angle between the incoming light and the viewer. The specular reflectance, where the

incident light is reflected into a single outgoing direction. Therefore, it can be often described as a mirror-like reflection of light from the surface such as glass or polished metal. If the surface is microscopically rough such as a paper, the light rays will reflect and diffuse in many different directions. The diffuse reflectance, where a ray incident on the surface is scattered at many angles. Only a small amount of the light is reflected back toward the light source.

The reflectance on the surface is spatially-varied because of the existence of microfacets. A microfacet is a tiny facet of the surface, and each of which is a perfect specular reflector. They have their own normals, that are distributed about the normal of the approximating smooth surface. These changes of microfacet normal effects the appearance at each spatial point. The degree to which microfacet normal differs from the smooth surface normal (unit normal) is determined by the roughness of the surface. It is quantified by the deviations in the direction of the normal vector of a real surface from its ideal form. If these deviations are large, the surface is rough; if they are small, the surface is smooth.

We characterize the total reflectance on a surface by using the Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) model, which defines how light is reflected at an opaque surface. It is a four-dimensional reflectance function of the incoming direction and the outgoing direction. A surface may reflect different amount of light at each position for each possible direction of incoming and outgoing light, and each spatial appearance may also differ. To account for these spatial appearance factors, which can be represented by Spatially Varying BRDFs (SVBRDF). The SVBRDF is a six-dimensional function. Therefore, the SVBRDF representation of material can be viewed as a spatial collection of BRDFs distributed over the surface.

There are many existing measurement methods which measure the reflectance in various way. But their systems require high cost apparatus and take long capturing time. We propose three measurement methods that can measure the spatially-varying reflectance of real materials using simple apparatus consisting of two handheld cameras.

In this thesis, we firstly measure the reflectance at a spatial point on the surface of anisotropic materials. Then, we measure the spatially-varying reflectance of isotropic materials, and finally, the spatially-varying reflectance of anisotropic materials are measured.

We verified the correctness of each estimated reflectance and observed brightness for RGB channels by using the fitting results. The correctness of estimated color and roughness values were confirmed by RGBA images and rendering results. The highlight changes for each material were confirmed by rendering results. The minimum of estimated residuals based on the least root-mean-square-error (RMSE) method were confirmed by 2D residual images. According to the results, our measurement method can be used to easily measure the spatially-varying reflectance of real materials.

論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、令和3年2月16日に論文発表会を公開で開催し、詳細な論文内容の審査ならびに質疑を行った。論文発表を含む学位論文の審査の結果、本提出論文を博士（工学）の学位論文として合格と判定した。以下に審査結果の要約を示す。

本論文は、実物体の見た目をコンピュータグラフィックス（CG）で正確に再現するために、簡易な装置を用いて物体の反射特性を計測するための手法を提案したものである。特に表面の粗い材料では表面の法線方向のばらつきや異方性反射を伴い、多くのパラメータを同時に推定する必要があることから困難な問題とされている。そこで本論文では、平面物体の異方性反射推定、非平面物体の等方性反射推定、非平面物体の異方性反射推定と三つの難易度の異なる問題設定において、装置で取得したデータから反射特性のパラメータを推定するためのアルゴリズムを構築している。また、それぞれに対して実物体を用いた計測実験により有効性の検証を行っている。

本論文は5章からなる。まず第1章ではCG分野における反射特性計測の重要性や、等方性材料と異方性材料の違い、微細表面の法線分布によってさまざまな反射特性が生じること、反射特性を表す関数であるBRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) やその空間分布を示すSVBDRF (Spatially-Varying BRDF) の定義などについて述べられている。また、従来の反射特性計測では装置サイズや計測時間に課題があることを指摘するとともに、本研究のアプローチについて述べている。

第2章では関連研究の調査を行っており、ゴニオリフレクトメータと呼ばれる装置を用いたものや、多数のカメラと光源を用いたもの、カスタマイズされた装置を用いたものなど、さまざまな反射特性計測手法の例を示し、その問題点についてまとめている。

第3章ではまず提案手法で用いる装置について述べている。二台のカメラと一個の光源、マーカー付きの回転台のみからなっており、従来の計測装置に比べて簡易な構成となっている。一台のカメラは光源を取り付けて三脚で固定し、もう一台のカメラを手でもってさまざまな方向から測定対象を撮影することで、推定に必要なさまざまな方向への反射を計測する。次に二台のカメラで同時に撮影した動画像からマーカーを検出し、光源と視点の位置を求める計算方法を示している。各時刻における光源と視点の位置および測定対象上の点に対応する画素値から、そのときの入射方向・反射方向と輝度の観測値を得る。計測するBRDFとしてWardのモデルを使用し、取得した観測値とモデルによる推定値の誤差の二乗和が最小になるようなBRDFのモデルパラメータを非線形最適化により求める。

以上が本研究における計測の基本的なフレームワークであるが、さらに今回測定対象として想定する平面物体の異方性反射推定、非平面物体の等方性反射推定、非平面物体の異方性反射推定のそれぞれについて、推定するBRDFのモデルパラメータと具体的な推定の手順を述べている。後者に行くほど推定すべきパラメータの数が増え、より難しい問題となっているため、初期値の与え方や推定を二段階に分けるなどの工夫を行っている。

第4章では提案手法を用いて実物体の反射特性推定を行った実験結果を示している。まず、平面物体中のある一点の反射特性を異方性Wardモデルを用いて表し、そのパラメータを推定するとともにCGレンダリングにより反射を再現した結果を示している。金属や紙などの等方性材料では方向によらず均一なハイライトが再現されたのに対し、布や髪などの異方性材料では方向によって異なるハイライトが再現された。このことから、提案手法が異方性反射を含む反射特性を計測可能であることが示された。

次に、一点における反射ではなく反射特性の空間分布を表すSVBDRFを推定する実験の結果が示された。

等方性 Ward モデルを用いて推定を行い、完全に平面ではない物体において法線分布を含めた推定が行えることや、レンダリング結果から元の物体にかなり近い見目が再現されていることが示された。

最後に異方性 Ward モデルを用いて SVBDRF を推定する実験の結果が示された。推定するパラメータの数が多いため、非線形最適化が局所解に陥る可能性も懸念されたが、推定結果からすべての点において欠損がなく推定が行えていることが確認された。また、レンダリングによる反射特性の再現や観測画像と推定画像の比較結果などによる推定結果の妥当性の評価が行われ、ある程度の妥当性と今後の改善に向けての指針が示された。

第 5 章では全体を総括し、残された課題について議論している。

本論文の主な内容は、査読付き学術雑誌論文 2 編（数理電子情報コースにおいて学術雑誌論文相当と見なす査読付き国際会議論文を含む）で公表されている。

以上のように、本論文の内容は、難易度の高い問題に取り組み、実物体を用いた実験により一定の有効性が示されていることなどから、学術的に意義のある研究であると評価できる。よって、当学位論文審査委員会は、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と判定した。