

曲率に依存した BRDF の計測とレンダリング

松藤 和夫 河合 直樹

大日本印刷株式会社 情報コミュニケーション研究開発センター

E-mail: {Matsufuji-K2 | Kawai-N}@mail.dnp.co.jp

異方性反射を表現する反射モデルとして BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) が提案されている。一方で、デニムや玉虫織りなどの素材は、表面の曲がり具合により見え方が変化する特徴があり、BRDF では正確な表現が不可能である。本研究では、BRDF に曲率の概念を導入し、実在する素材について BRDF を複数の曲率で計測し、レンダリングに反映させることで、正確に表示する手法を提案する。

Measurement and Rendering of Curvature Dependent BRDF

Kazuo Matsufuji Naoki Kawai

Media Technology Research Center, Dai Nippon Printing Co., Ltd.

BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) has been proposed as a reflection model for representing anisotropic reflection. However, it is impossible to represent accurate reflection properties of materials such as denim and shot fabric that vary depending on curvature.

We propose a new method for rendering images using accurate reflection properties of materials, by introducing curvature dimension into BRDF and measuring BRDF of the materials with multiple curvatures.

1. はじめに

CG において物体表面上の質感を写實的に表現するさまざまな手法が提案されている。代表的な手法として、テクスチャマッピングが挙げられ、写真を利用して物体表面上の複雑な模様を再現することができる。また、異方性反射の質感を再現するために、視線方向と光線方向を考慮した反射モデルである BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) [1] が提案されており、削りだしやシルクなど見る方向や光源の位置により見え方が変化する素材に対し、反射特性を再現することができる。

一方、デニムや玉虫織りなどの縦糸と横糸の織

維の色が異なる布地や、タオルやビロードのようなパイル地などは、曲がり具合によって見え方が変化する特徴を持つ。このような素材では、湾曲により素材表面の微細構造が変化し、その結果反射特性が変化すると考えられる。現在提案されている BRDF などの反射モデルでは、湾曲という概念は考慮されておらず、湾曲による見え方の変化を正確に表現することが不可能である。

本研究では、BRDF に曲率の概念を導入することで、異方性の反射特性を持ち、かつ表面の曲がり具合により見え方の異なる素材を正確に表現する手法を提案する。曲率に依存した反射関数を導出するため、実在する素材について BRDF を複数の曲率で計測し、レンダリングに反映させることで提案手法の有効性を確認する。

2. 従来手法

CGでは様々な反射モデルが提案されており、通常、レンダリングを行う際には目的に応じた反射モデルを使い分ける。実用的に用いられているほとんどの反射モデルでは、実質的には物体表面の反射率を定義する。例えば、Phongの鏡面反射モデルでは、正反射方向と視線のなす角に基づいた反射率を定義する。実際のレンダリング時には、注目位置における反射率とその位置に照射されている光線との関係から、対応する画素における反射光の強度を決定する。より具体的には、その位置には複数の方向から光線が照射されているため、照度分布に関して入射光強度と反射率を畳み込んで積分することにより、反射光強度を計算する。

Phongの鏡面反射モデルでは等方性の反射特性のみを扱っており、布地やブラシ仕上げの金属のような異方性反射を生じる素材に対しては、正確な反射特性を表現できない。異方性反射特性を扱う手段として、BRDFと呼ばれる反射モデルが提案されている。BRDFでは物体表面における光の入射角 (θ_i, ϕ_i) および反射角 (θ_r, ϕ_r) に依存した反射率を定義し、レンダリング時には注目位置における光線方向および視線方向に基づいた反射率を参照しながら反射光強度を計算する。

BRDFでは、視線方向や光線方向に依存した反射モデルとして素材の反射特性を定義しているが、素材の形状に関わらず反射特性が一定なモデルであり、例えばパイル地のような湾曲により見え方の異なる素材の反射特性を表現することは不可能である。

筆者らは、このような素材の反射特性を表現するため、反射モデルに対し曲率の概念を導入する考え方を提案した [2]。その一具体例として、テクスチャマッピングに曲率の概念を導入し、曲率に依存した素材の表面微細構造をモデル化して簡易的なシミュレーションを行うことで、反射率を曲率に依存した関数として算出した。レンダリ

ング時に注目点における曲率を用いて反射率を参照することで、湾曲による素材の見え方の変化を再現できることを確認し、提案モデルの有効性を検証した。

この手法では、曲率は考慮しているものの、等方性の反射特性のみを扱っており、デニムや玉虫織りのような異方性の反射特性を正確に表現できない。また、素材の微細構造に基づいて曲率に応じた反射率を求めるため、素材ごとに微細構造をモデル化する必要がある。これは一般性を欠く上、実在する素材表面の反射特性を正確に表現できないという課題がある。

他方、尾上ら [5] は、微細凹凸形状によって生成される影を擬似再現するバンパマッピングシャドウ技術について、形状の曲率を考慮することにより擬似生成される影を高精度に再現する手法を提案したが、反射率の変化に関しては言及していない。

3. 提案手法

本研究では、異方性かつ素材の湾曲度合によって変化する反射特性の表現を目的とする。そこでBRDFに対し、新たに曲率の次元を付加し、視線方向と光線方向、曲率の全てに依存した新たな反射関数を提案する。このような反射特性を持つ素材の例として玉虫織りとデニムを取り上げ、実在の素材を計測することで反射関数を導出し、この反射関数を参照しながらレンダリングすることで提案手法の有効性を検証する。

3. 1. 湾曲による素材表面の微細構造の変化

湾曲により見え方が変化する素材として、図1に示すような玉虫織りやデニムの布地が挙げられる。これらの素材は異なった色の縦糸と横糸で織られており、湾曲することにより素材表面の微細構造が変化し、その結果反射特性が変化すると推

測できる.

例えば、図2に示すような濃紺の縦糸と白色の横糸で綾織りされた一般的なデニムの場合、素材が湾曲するに従い横糸が露出する。この変化は、微視的には可視比率の変化に過ぎないが、巨視的には素材の反射特性が湾曲により徐々に淡色に変化することを意味する。玉虫織りでも縦糸と横糸の色が異なるため、デニムの場合と同様の微細構造変化が起き、湾曲により反射特性が変化すると考えられる。このようにいくつかの素材では異方性の反射特性を持つだけでなく、曲率に依存した反射特性も持つ。

3. 2. 異方性反射関数への曲率の導入

BRDFに曲率の概念を導入した新しい反射関数を CDBRDF (Curvature Dependent Bi-

directional Reflectance Distribution Function) と呼ぶこととし、5次元の連続な関数として定義する。

$$R = CDBRDF(\theta_r, \phi_r, \theta_L, \phi_L, \kappa)$$

ここでRは素材表面の反射率、 θ_v 、 ϕ_v は注目点における視線方向の仰角と方位角、 θ_L 、 ϕ_L はその点における光線方向の仰角と方位角、 κ はその点における素材表面の曲率をそれぞれ表す(図3参照)。ただし仰角は法線方向を 0° とし、曲率は半径の逆数(単位: mm^{-1})で表す。曲面上の任意の点についての曲率は、2つの主方向 ϕ_1 、 ϕ_2 に対してそれぞれの主曲率 κ_1 、 κ_2 が得られるが、本研究では方向を考慮せず最大曲率を利用する。

レンダリングの際には、注目点における視線方向と光線方向、曲率を用いてCDBRDFを参照し、その条件下での素材の反射率を決定する。

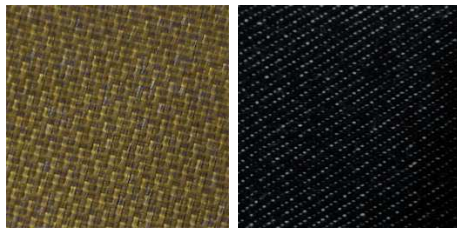
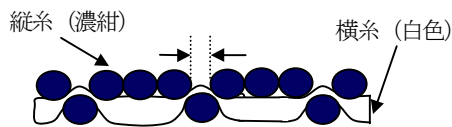
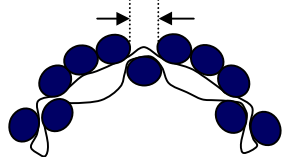


図1 素材例(左:玉虫織り 右:デニム)



(a) 平らなデニムの断面



(b) 湾曲したデニムの断面

図2 デニム断面の微細構造

3. 3. 曲率に依存した異方性反射関数の取得

CGで利用される反射関数の導出方法は、2つのアプローチに大別できる。一方は実物の素材から反射特性を直接計測する手法[3]であり、他方は素材表面の3次元構造を詳細にモデル化し、その形状を基に何らかの手法で光の伝達シミュレーションを行い反射関数を生成する手法[4]である。本研究では、前者のアプローチを利用し、素材をさまざまな条件下で撮影し、曲率に依存した異方性反射関数の導出を行う。

本研究では図4に示すBRDFの取得が可能な

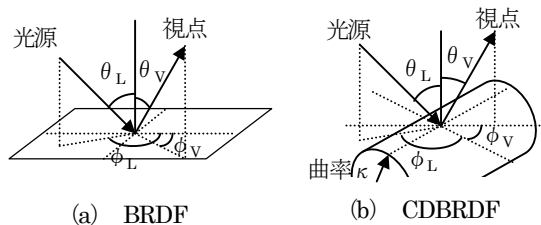


図3 従来手法と提案手法の反射モデル座標系

装置を利用して任意の視線方向及び光線方向で撮影することで素材の反射特性を取得する。提案手法では曲率ごとの BRDF の取得が必要となる。このため図5に示すようにさまざまな曲率の円柱面を持った試料台を作製し、この円柱面に素材を貼り付けてそれぞれの曲率における BRDF を取得する(図6参照)。これらの入力画像群からそれぞれの条件における反射率を算出するため、試料台の中心位置の近傍における画素値の平均値を利用する。

現実には離散的な視線方向、光線方向、曲率における反射率が取得されるので、レンダリング時に特定される連続的な視線方向、光線方向、曲率

の値を用いて5次元の補間を行い、得られた補間値をその条件下での反射率として利用する。

4. 実験結果

4. 1. 撮影

反射特性の再現精度と計測データ量はトレードオフの関係にあり、計測時のサンプリング間隔を調整することで制御することができる。今回の実験では、サンプリング間隔を次のように設定した。視線方向及び光線方向のそれぞれに対し、仰角については素材の法線方向を 0° とし 0° から 75° までを 15° 間隔で6ステップ、方位角については 30° 間隔で12ステップの計72方向とした。また、曲率については、 -0.22 , -0.13 , 0.0 , 0.13 , 0.22 の5段階にサンプリングした。入力画像サイズは 980×980 pixel とし、その画像群の試料台における中心位置および 7×7 近傍の画素値の平均値を利用し、反射率を算出した。



図4 撮影装置

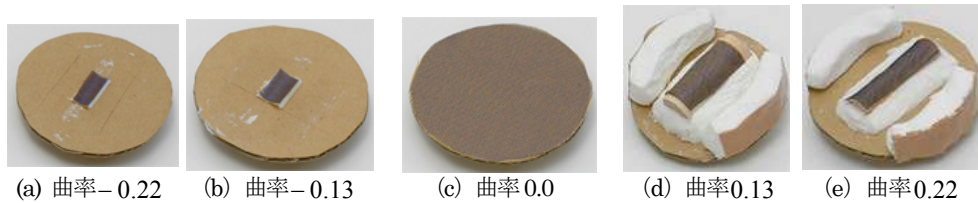


図5 曲率ごとの試料台及び試料台への素材貼り付け例(素材:玉虫織り)



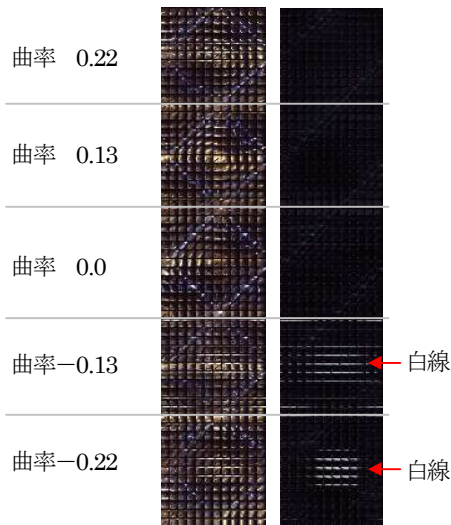
図6 曲率ごとの入力画像群(素材:玉虫織り)

4. 2. 曲率依存異方性反射の確認

入力画像群から取得した各反射率を図 7 のように規則的に配列し、曲率ごとの BRDF として整理した。1つの BRDF を光線方向、視線方向それぞれについて方位角ごとに仰角順に画素値をまとめ、それを方位角順に整理した。ここで曲率ごとの BRDF を比較することで曲率に依存した反射率の違いを取得できていることが確認できる。例えば図 7a の曲率 0.13 の BRDF と曲率 0.0 の BRDF の中心付近において、前者では明るい黄色を示しているのに対し、後者では黄土色を示しており、曲率の違いによる反射率の差が確認できる。

4. 3. レンダリング時の反射率の参照

視線方向 θ_v, ϕ_v , 光線方向 θ_L, ϕ_L , 曲率 κ の 5 変数は、本来は連続な値であるのに対し、CDBRDF は離散的な条件下で計測されているので、レンダリング時に与えられる 5 変数 (連続値) から反射率を直接参照できない。そこで 5 次元の線形補間を行い、近似色を生成し利用した。



(a) 玉虫織り (b) デニム
図 7 素材ごとの CDBRDF 例

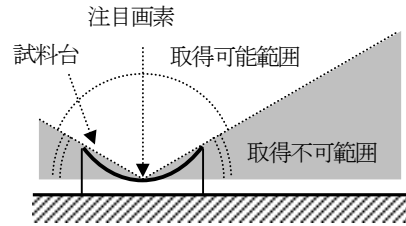


図 8 注目画素の反射特性を取得できない範囲

ここで図 8 に示すような凹形状の試料台で対象素材を撮影する場合、注目画素の位置に対し、撮影や照明が不可能な範囲が存在し、反射特性が取得できない。そこで取得不可範囲の視線方向や光線方向の画像は利用しないものとする。この条件下では、試料台の側面 (白色) を撮影してしまい、図 7b の白い横線に見られるように本来の素材の反射率ではない値が得られてしまう。取得不可範囲の反射特性を決定するため、最も近い取得可能範囲の反射特性を代用するものとする。

4. 4. レンダリング結果

実際に CDBRDF を適用したレンダリングを行い、提案手法の効果を検証する。ここではサインカーブを奥行き方向にスイープした形状を生成し、平行光源を 1 つ設定する。提案手法と従来手法を比較するため、生成した形状に CDBRDF と BRDF をそれぞれ適用し、レンダリングを行った結果を図 9, 10 に示す。従来手法 (BRDF) と比較し、提案手法 (CDBRDF) では、曲率の大きい部分 (サインカーブの頂上付近) において色の変化が観察でき、素材の曲がり具合による見え方の変化を再現していることが確認できる。

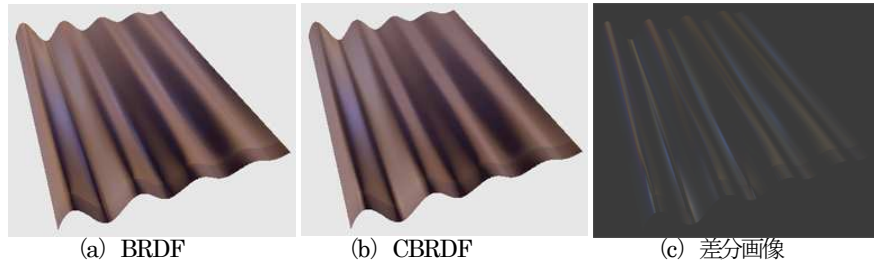


図9 玉虫織りのレンダリング結果

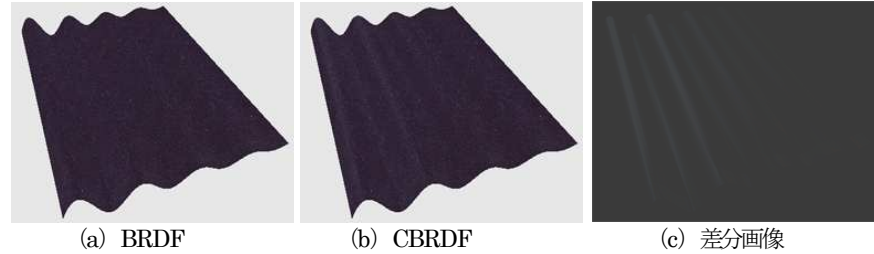


図10 デニムのレンダリング結果

5. まとめ

本研究では、素材の曲がり具合（曲率）に依存した異方性の反射モデル（CDBRDF）を提案し、実際の素材から曲がり具合に応じた異方性の反射特性を計測し、取得した CDBRDF を用いたレンダリングを行い、提案手法の効果を確認した。

同様の拡張は、一般的な反射モデルに対して適用可能である。例えば、テクスチャの各画素（テクセル）について BRDF と同様に入射方向および反射方向の関数として拡張した BTf (Bi-directional Texture Function) [3] と呼ばれる 6 次元の反射モデルが提案されているが、今後は BTf のような高次元反射モデルに対しても曲率への拡張を試み、効果を検証していきたい。

参考文献

- [1] Michael F.Cohen and John R.Wallace, Radiosity and Realistic Image Synthesis. Academic Press Professional, 1993.
- [2] 松藤 和夫, 河合 直樹, 曲率に依存した反射モデルの提案. FIT2005 第5回情報科学技術フォーラム (FIT2005), J-038, pp263-264, 2005
- [3] K. Dana, B. van Ginneken, S. Nayar, and J. Koenderink, Reflectance and texture of real world surfaces. ACM Transactions on Graphics (TOG), 18(1): pp.1-34, 1999.
- [4] Pierre Poulin, Alain Fournier, A Model for Anisotropic Reflection. Proceedings of SIGGRAPH '90, Vol.24, No.4, pp.273-282, 1990
- [5] 尾上 耕一, ネルソン・マックス, 西田友是, 曲率を考慮したバンプマップシャドウ, 第 113 回情報処理学会グラフィックスと CAD 研究会, pp.63-68, 2003.