

曲率に依存した反射モデルの提案 A Proposal for Curvature Dependent Reflection Model

松藤 和夫†
Kazuo Matsufuji

河合 直樹†
Naoki Kawai

1. はじめに

本研究では、素材表面の曲がり具合(曲率)に依存した反射モデルを提案し、提案モデルに基づいた一実現手法による反射関数の構築、および有効性の検証を行う。

近年、CGを活用した写実的表現が可能になりつつあり、様々な分野での活用が進んでいる。しかし、一部の素材では、写実的表現が困難な場合がある。そのような素材の例として、デニムや玉虫織りなどの縦糸と横糸の繊維の色が異なる布地や、タオルやピロッドのようなパイル地など、曲がり具合によって見え方が変化するものが挙げられる。曲がり具合による素材の見え方の変化は、湾曲により素材の反射特性が変化したためであるとみなすことができる。

現在のレンダリングで利用される反射モデルでは、湾曲という概念は考慮されておらず、湾曲に依存した見え方の変化を表現することが困難である。本研究では、曲率に依存した反射モデルを提案し、提案モデルに基づいた一実現手法を適用し画像を生成することにより、素材表面の曲がり具合によって変化する見え方について提案モデルの有効性を検証する。

2. 関連研究

CGでは様々な反射モデルが提案されており、レンダリングを行う際、目的に応じて反射モデルを使い分けている。実用的に用いられているほとんどの反射モデルは、実質的には物体表面の反射率を定義している。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光の強さを決定する。より具体的には、その位置には複数の光源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、反射光強度を計算している。

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が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 (Bi-directional Reflectance Distribution Function) [1]と呼ばれる反射モデルが提案されている。BRDFでは、物体表面に対する光の入射角(θ_L, ϕ_L)および反射角(θ_v, ϕ_v)に依存した反射率を定義し、レンダリング時は、注目位置において光線方向および視線方向に基づいて反射率を参照しながら反射光強度を計算する。

しかし、BRDFでは反射特性が物体表面の位置に依存せず一様であるため、表面に模様を持つ物体を表現するこ

とができない。物体表面の模様を表現するための方法としてはテクスチャマッピングが広く用いられている。

テクスチャマッピングでは模様を表現するために、反射率を位置に依存した関数として定義しているが、視線や光線などの方向に依存した見え方の変化を表現することができない。そこで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) [2]と呼ばれる反射モデルが提案されている。

BRDFやBTFでは、視線方向や光源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、マッピング先の形状の湾曲を考慮しておらず、素材の曲がり具合による見え方の違いを表現することは困難である。

一方、曲率を考慮した質感表現の研究としては、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プ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尾上ら[3]が提案している。

3. 曲率依存反射モデル

本研究では、素材の曲がり具合に応じた反射特性をモデル化することを目的とする。反射モデルの具体的な例として、位置のみに依存した反射関数であるテクスチャマッピングを拡張し、位置と曲率に依存した新たな反射関数を導入する。曲率に依存した反射特性を持つ素材の例として、パイル地を取り上げて提案手法の検証を行う。

一般的に反射関数を導出する具体的な手法は、実際に素材の反射特性を計測するアプローチと、素材の微細構造を単純化したモデルから光学特性をシミュレーションして反射関数を算出するアプローチの2つに大別できる。本研究では、後者のアプローチをとることとし、テクスチャマップに対して曲率を変数に加えた反射関数を生成するための微細形状モデルと反射関数生成手順を示す。

3. 1. 湾曲した素材の微細構造

毛布やタオルなど起毛のある素材や、デニムのように縦糸と横糸の色が異なる複合素材は、曲がり具合により反射特性が変化する。これは、素材が湾曲することにより、素材表面の微細構造が変形し、このことにより反射特性が変化するものと推測できる。

例えば、タオルのように微細なパイル構造(図1(a)参照)を持つ素材では、パイルの配列が素材の湾曲に応じて変化し、その結果、パイルの間から徐々に下地が露出することになる(図1(b)参照)。パイルの色と下地の色が異なる場合、素材の曲がり具合による下地の露出割合が変化することは、巨視的には素材の反射率が曲率に依存して変化することを意味する。

3. 2. 反射モデルへの曲率の導入

各種の反射モデルに対し、曲率による変化を表現するためには、その反射関数の新たな変数として曲率を加えることが必要である。

† 大日本印刷株式会社
{Matsufuji-K2 | Kawai-N}@mail.dnp.co.jp

テクスチャマッピングの例では、座標値 (x, y) を与えると色を返すテクスチャ関数 $Color = f(x, y)$ に対し、曲率 κ を新たに変数として加えた関数 $Color = f(x, y, \kappa)$ を定義することにより、曲率に応じて色が変化するテクスチャを表現することができる。

3. 3. 曲率に依存した反射関数の導出

本節では、図1に示した微細構造モデルに基づいて、テクスチャマッピングに対して曲率による反射率の変化を導入するための一手順を示す。

ここでは図1に示したように、一次元上に簡略化して配列した下地とパイルを含む素材に対して、曲げを加えた時の微細構造の変化について考える。各々のパイルは、下地に対して垂直に固定されているものと仮定する。下地が湾曲することで、各々のパイルは付け根における下地の傾きに応じた法線方向に配向し、パイルの相互間隔は先端へ行くほど広くなり、パイルの隙間から下地が見えるようになる。さらに、湾曲が大きくなるにつれ、下地が見える割合が大きくなる。

この素材に対して様々な湾曲させて、注目位置における法線方向無限遠から観察する。この観察によりパイルと下地の相対的な可視比率を曲率に依存した関数として算出することができる。この可視比率を利用して、任意の曲率における反射率を取得できる。

$$Color(\kappa) = Ratio(\kappa) \times Color_{base} + (1 - Ratio(\kappa)) \times Color_{pile}$$

ただし、

$$Ratio(\kappa) = \int_0^L \frac{Judge(u, \kappa)}{L} du$$

$$Judge(u, \kappa) = \begin{cases} 1 & \text{点}u\text{で下地が見えるとき} \\ 0 & \text{点}u\text{で下地が見えないとき} \end{cases}$$

関数 $Color(\kappa)$ は、曲率に依存したテクスチャ関数であり、曲率 κ に応じた色の変化を表す。ここで混合比率 $Ratio(\kappa)$ は、曲率 κ における下地の可視比率であり、 $Judge(u, \kappa)$ は、曲率 κ 、注目位置 u における下地の可視判定関数である。

レンダリング時には、注目位置での曲率 κ に応じて $Color(\kappa)$ を参照し、反射率を取得することにより、素材表面の曲がり具合に応じた反射特性の変化を表現できる。

曲面上の任意点における湾曲は、主曲率 κ_1, κ_2 と主方向 ϕ_1, ϕ_2 で表されるが、本検証では最大曲率 κ_1 を用いる。曲率は、Wangらと同様の手法[4]を用いて求める。

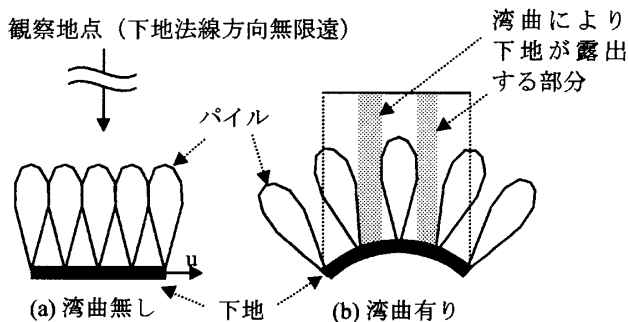


図1 湾曲による素材表面の微細構造の変化

4. 結果

下地が白色、パイルが三色で構成された素材に対して湾曲させてレンダリングした結果を図2(b)に示す。

レンダリングにおいては、形状データの各画素に対応する点において、テクスチャ座標値と共に曲率を取得し、前章に記載した反射関数に基づいて取得した反射率を用いて拡散反射成分のみを考慮した。図2(a)に示した従来手法と比較し、曲率の大きな凸部において下地の白色が観察でき、パイル構造が示す特有の質感が表現されていることが確認できる。

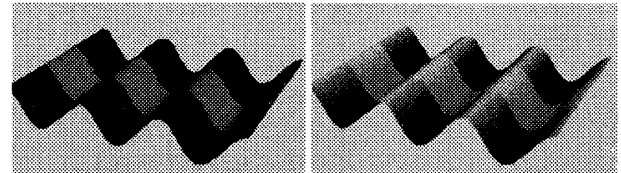


図2 テクスチャマッピングのレンダリング結果

5. まとめ

本研究では、素材表面の曲がり具合(曲率)に依存した反射モデルを提案し、曲率に依存した反射モデルの一例として、2次元の反射関数であるテクスチャマッピングに対して、曲率を表現する第3の次元への拡張を試みた。

同様の拡張は、一般的な反射モデルに対して容易に適用可能であり、今後はBRDFやBTFなどの高次元反射モデルにおける提案手法の効果を検証していきたい。

また、本研究では素材表面の微細構造に基づいたシミュレーションにより反射関数を算出するアプローチを試みたが、実物の素材を様々な湾曲させ撮影することで、曲率に依存した反射関数を計測することが可能である。特に高次元反射モデルについては近年様々な測定装置が提案されており[5]、これらを利用することができる。

また、現実の素材の反射特性が変化する理由として、湾曲による素材表面の微細構造の変化だけでなく、張力などに起因する繊維束自体の性質の変化も考えられるため、曲率以外の要因について、曲率と同様に反射特性の一変数として、拡張を考えていきたい。

[参考文献]

- [1] Michael F. Cohen and John R. Wallace, Radiosity and Realistic Image Synthesis. Academic Press Professional, 1993.
- [2] 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.
- [3] 尾上 耕一, Nelson Max, 西田 友是: "曲率を考慮したパ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.
- [4] L. Wang, X. Wang, X. Tong, S. Lin, S. Hu, B. Guo, and H.-Y. Shum. View-dependent displacement mapping. ACM Transactions on Graphics (TOG), 22(3): pp.334-339, 2003.
- [5] G. Muller, J. Meseth, M. Sattler, R. Sarlette and R. Klein, Acquisition, Synthesis and Rendering of Bi-directional Texture Functions. In Eurographics 2004 STAR (State-of-the-Art Reports), 2004.