

拡張現実感を用いた様々な環境下における 対数美的曲面の印象評価に関する研究

平野亮[†] 原田利宣[†] 床井浩平[†]

本研究では、拡張現実感により現実空間における光源環境を再現し、その中で対数美的曲面をシミュレーションするシステムを開発した。具体的には、精密な拡散反射色で曲面の映り込みを再現するため、金属半球に反射した光源環境を球面調和解析した結果を用いてレンダリングを行った。また、開発したシステムを用いて、様々な環境下（晴天、曇天、夕日など）における曲面の印象の違いに関する評価実験を行い、環境が曲面の印象に与える影響を明確にした。

A study on impression evaluation of a log-aesthetic curved surface under various environments with an Augmented Reality

Ryo Hirano[†] Toshinobu Harada[†] Kohe Tokoi[†]

In this study, we developed a simulation system that reproduced the light source environment in a real world with Augmented Reality, and simulated a log-aesthetic curved surface in the system. Concretely, this system renders the curved surfaces using the result of spherical harmonics analysis of the light source environment image that is reflected by the metallic hemisphere in order to reproduce the diffuse reflection of the curved surface. Moreover, we experimented in the impression evaluation of curved surfaces under various environments (fine, cloudy, and evening sun, etc.) with the developed systems and clarified the influence of the light source environment to the impression of curved surfaces.

1. はじめに

一般に自動車などの工業製品のデザイン工程では、デザイナーのスケッチを元に CAD 上で製品の曲面設計（3D モデル化）が行われ、次に、VR システムを用いてその 3D モデルの評価が行われる。また、その 3D モデルから実寸大のクレイモデルを製作して屋内外の検討場でモデルの評価が行われる。曲面は、環境により変化する映り込みやハイライトによりその印象が異なる。よって、実際に製品が使用される環境を考慮して CAD 上で曲面設計することが必要となる。しかし、設計段階で実際に製品が使用される環境の影響を完全にイメージして曲面を設計することは難しい。その結果、クレイモデルの曲面を評価する際、イメージした印象と異なる場合、モデルの調整や作り直しを行い、再度評価を行わなければならない、膨大な工数とコストが必要となる。

また、曲面の創成に関する研究として原田らによりデザイナーの意図する高品質な曲線、曲面を創成するための研究が行われている¹⁾。これらの研究により、CAD 上で高品質な曲面の創成が可能となり、モデル製作段階において多大なコスト削減が可能となる。しかし、これらの研究においても環境を考慮した曲面の印象評価に関する研究は行われておらず、最終的な曲面の確定までには実物のモデルの作成し、評価と調整が必要となる。曲面の評価に関する研究には、3D におけるハイライトの入り方や色の表現などを正確に再現する研究^{2, 3)}が多く、様々な環境下で曲面にどのような環境が映り込むのか、それによりどのような印象をもたらすのかを明確にする研究は行われていない。

そこで、本研究では対数美的曲面創成の応用研究として、環境の影響をリアルタイムに反映しながら対数美的曲面を創成するシステムの開発を目的とした。また、様々な環境下（晴天、曇天、夕日など）で、曲面の印象にどのような違いが生じるのかに関する印象評価の実験を行い、環境が曲面の印象に与える影響を明確にする。そのために、対数美的曲面を 3D モデル化し、環境の影響を考慮したレンダリングを行う手法を開発する。また、拡張現実感（以下 AR）技術を用いて現実環境に重ねて曲面を表示するシステムを開発し、そのシステムを用いて印象評価の実験を行う。

2. 対数美的曲面とは

対数美的曲面の理解に必要な曲率・振率対数分布図と対数美的平面曲線、対数美的空間曲線と、対数美的曲面について以下に述べる。

2.1 曲率対数分布図と対数美的平面曲線

原田らによって、コンピュータ上でデザイナーの感覚にあった美しい平面曲線を創成

[†] 和歌山大学
Wakayama University

する手法が提案されている。この研究では、曲率の変化とボリュームから曲線の性質を定量的に表す「曲率対数分布図」を提案し、ヒストグラムの頂点を結んだ線である *C curve* が直線であるとき、自己アフィン性を持つ曲線であることを示した⁴⁾。

2.2 対数美的空間曲線

井上らは曲率対数分布図と同様にして振率に対して「振率対数分布図」を考案した⁵⁾。具体的には曲率対数分布図と同様にヒストグラムの頂点を結んだ線を *T curve* と定義し、*T curve* が直線となる時、空間曲線は振率について自己アフィン性を持つことを示した。このような空間曲線を対数美的空間曲線という。

2.3 対数美的曲面

一般的にクレイモデリングで用いられている曲面の造形手法を元にして、1本のガイド線と2本の基準線と呼ばれる面を特徴づける曲線を用いて曲面を創成する。このとき2本の基準線はガイド線の両端での曲線とし、一方の基準線の形を他方の基準線の形に徐変させながら曲面を作る。萩原らは、この徐変していく基準線上のある点における、曲率・振率の変化を表す曲率・振率対数分布図の *C curve* と *T curve* の傾きが一定であるとき、この曲面を対数美的曲面と定義した¹⁾。

3. Precomputed Radiance Transfer

一般的なリアルタイム3Dグラフィックスでは、光源からの光が直接及ぼす影響しか考慮されていない。しかし、現実世界では物体表面に当たった光のエネルギーは、物体の表面を伝播して、表面上の他の点にも影響を及ぼす間接光が存在する。このような複雑な光の伝播を、事前にオフラインで時間をかけて計算し、リアルタイムレンダリング時にオフラインで計算した結果を用いて最終的なレンダリング結果を算出するレンダリング手法をPrecomputed Radiance Transfer (以下PRTとする) という⁶⁾。本研究では、曲面の正確な拡散反射光を再現するためにPRTを用いた。

3.1 Image Based Lighting

PRTではシーンを取り巻く情景を環境マップとして、光源に見立ててライティングを行うImage Based Lighting (以下IBLとする) が用いられる。レンダリングを行う3Dモデルのポリゴンを構成する各頂点の法線方向に基づいて環境マップを参照し、テクセル値を光源として陰影演算を行う。

IBLを行うには、3Dモデルの頂点ごとに全方位の遮蔽情報と法線情報を記録し、レンダリング時に視線の向きを考慮して環境マップを参照し、ライティングを行う必要がある。そのため、記録する情報の量が多大となり、情報を圧縮するために「球面調和関数」が用いられる。

3.2 球面調和関数

PRTでは環境全体から差し込む光(環境マップ)を球面調和関数の線形結合で近似する。球面調和関数は(1)式に表され、任意の関数を任意の次数の球面調和関数とその係数との線形結合で表すことを球面調和展開と呼ぶ。各次数の球面調和関数が環境を覆う各周波数の光源を表し、その球面調和関数が放つ光を、係数を用いて混ぜ合わせることで光を近似することができる。

$$y_l^m(\theta, \varphi) = \begin{cases} \sqrt{2} K_l^m \cos(m\varphi) P_l^m(\cos\theta), & m > 0 \\ \sqrt{2} K_l^m \cos(-m\varphi) P_l^m(\cos\theta), & m < 0 \\ K_l^0 P_l^0(\cos\theta), & m = 0 \end{cases} \quad (1)$$

l : 次数 (band index) m : $-l < m < +l$ K : 単位化係数 P : ルジャンドル陪関数

3.3 レンダリング方法

環境マップを球面調和展開して算出された係数を一列に並べたベクトルを、ライトベクトルと呼ぶ。このライトベクトルは物体表面上での反射、物体表面に届くまでに他の点で反射された光が加わることや、遮蔽によって変化する。この変化を事前にシミュレーションしておき、レンダリング時に合成して最終的な結果を得る。

物体表面上での反射を双方向反射分布関数(BRDF)、物体による遮蔽を遮蔽関数としてそれぞれ求めて掛け合わせ、これに他の点で反射された光を加え輸送関数を算出する。この輸送関数も環境マップと同様に球面調和展開し、係数(輸送係数)を算出する。3Dモデルの頂点ごとの事前に算出した輸送係数とライトベクトルの内積の値が最終的な物体表面での放射輝度となり、これがレンダリングの結果となる。

4. ARを用いた対数美的曲面創成システム

本研究では実環境での曲面を再現するために、実環境の映像をそのまま使用して再現することのできる、ARを用いてシステムを開発した。開発したシステムは、2章で述べた対数美的曲面をコンピュータ上で3Dモデル化、3章で述べたPRTを用いて周囲の光源環境の情報を球面調和展開し、それをもとにレンダリングを行う。最後に、AR技術を用いて現実環境に重ねてモデルに表示する。また、本システムのフローを図1に示す。

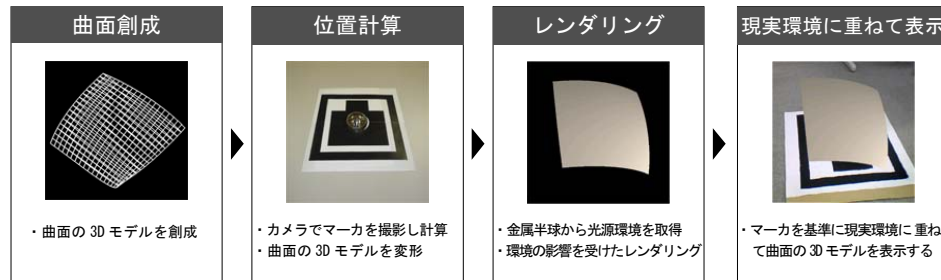


図 1 システムのフロー図

4.1 球面調和解析を用いたレンダリング手法の開発

環境下での曲面の拡散反射色の分布を正確に再現するために、3D モデルを表示する現実世界の周囲の光源環境を用いてレンダリングを行う。リアルタイムに AR で実現するため、2章で述べた PRT を用いた。

Robin Greenが提案した手法⁷⁾で、対数美的曲面の 3Dモデルの周りの環境の影響を受けた拡散反射色の分布の再現を行う。レンダリングを行う前に、計算負荷の大きいモデルの各頂点の遮蔽や間接光の影響を輸送係数として算出する。次に、金属半球に反射した光源環境を撮影し取得する。取得した画像を球状環境マップに変形した後、Ravi Ramamoorthiらが提案した手法⁸⁾を用いて光源環境の球状環境マップを球面調和解析し、ライトベクトルを算出する。

レンダリング時に、算出したモデルの各頂点の輸送係数と、ライトベクトルの内積を計算することで、現実環境の拡散反射色の分布を再現する。また、球面調和展開は次数の小さい球面調和関数から順に選択されるため、低周波数の近似に向いており、高周波数の近似に向いていない。よって、鏡面反射光を近似することはできないので、金属半球に反射した光源環境を球状環境マッピングすることで鏡面反射光を再現し、周辺の光源分布に基づく曲面の映り込みを再現する。この結果、現実環境の影響を受けた曲面再現することができる。

4.2 AR を用いた対数美的曲面創成システムの開発

まずヘッドマウントディスプレイにWebカメラを装着し、人間の視線方向をカメラで撮影する。その映像の中から、ARToolKit⁹⁾を用いて 3Dモデルを表示するための位置の基準となるマーカを検出する。マーカの映り方からカメラの姿勢・位置を推定し、視線方向から幾何学的整合性のとれた 3Dモデルを表示するために位置合わせ計算を行う。マーカの検出と同時に周囲の光源環境を取得できるようにマーカの中心に金属半球を設置した。マーカの位置と金属半球の半径から金属半球の位置を推定し、2 値化して抽出する。

つぎに、対数美的曲面の 3D モデルを創成、位置合わせの計算結果を用いて変形し、前節で述べたレンダリング方法を用いてレンダリングした後、現実環境に重ねて表示する。ユーザはヘッドマウントディスプレイを通して、現実環境に対数美的曲面を見ることができる。マーカは屋外で使用する際に、太陽光により白く飛んでしまわないようにフェルトを使用した。

5. 曲面の環境が与える印象評価実験

曲面の環境が与える印象の違いを明確にするために印象評価実験を行った。まず、樹脂木材を用いて NC マシンにより切削して製作した対数美的曲面を用いて評価を行い、次にシステムを用いて評価を行った。

5.1 実物の対数美的曲面を用いた評価実験

樹脂木材を用いて NC マシンにより切削して製作した対数美的曲面にダイノックフィルムを貼り、複数の環境下において印象評価実験を行った。同じ曲面を用いて、同じ場所で、天気（晴れ、曇り）と時間（昼、夕）の環境を変えて行った。時期は1月上旬である。その結果を以下に示す（図2）。

- 晴れの日の昼の対数美的曲面は、太陽の光が強いため曲率半径が大きい部分で白く飛んでしまい、陰影がつかずに丸みがわからないため、面が平面的に見えた。その一方で、曲率半径の小さい部分は、はっきりと陰影がつき丸みが強調された。その結果、曲面に折れがあるように感じた。
- 晴れの日の夕方の対数美的曲面は、曲面全体に陰影がはっきりとつき、丸みにより強調されボリューム感を感じた。
- 曇りの日の昼の対数美的曲面は、曲面全体に陰影がつかず、丸みがわからないため、面全体が平面的に見え、シャープな印象を受けた。

同じ曲面であっても3つの環境下において明らかに印象が異なった。陰影がつくことでボリューム感を強く感じ、曲面の丸みが強調されると考えられる。



図 2 実物の曲面の環境による違い

5.2 開発したシステムを用いた印象評価実験

開発中のシステムを用いて 5.1 節と同様の環境下で印象評価実験を行っている。システムの実装にはデスクトップ PC (CPU Intel®Core™2 Quad CPU Q9550(2.8GHz), システムメモリ 4GB, ビデオカード NVIDIA GeForce9800GT(512MB) 2 枚) を用いている。実装できている範囲で実験を行った結果を以下に示す。

- 晴れの日の昼の対数美的曲面は、実物と同様に曲率半径が大きい部分では、単一色になり平面的に見えた。曲率半径の小さい部分は、徐々に色が変化し丸みを感じられた。曲面の大部分が平面的であり、曲率半径の小さい部分のみが変化しているように見えた。
- 晴れの日の夕方の対数美的曲面は、他の 2 つの環境に比べて色の変化が大きかった。特に、曲率半径の小さい部分では影の色が強くなった。
- 曇りの日の昼の対数美的曲面は、実物と同様に曲面全体がほぼ単一色であり、面全体が平面的に見えた。視線を変え、映り込みが変化することで丸みがかろうじて感じられた。また、対数美的曲面のパラメータを変更して、変化をより大きくすることで陰影がつき、丸みを感じられるようになった。

本研究では、材質再現を行っていないため、対数美的曲面の 3D モデルが周りの光源環境の影響を受け拡散反射色が大きく異なると考えられる。しかし、各環境でシステム上の曲面は、実物の曲面と“色の変化の仕方”が同様となった。

5.3 考察

曲面の環境が与える印象の違いを確認することができた。しかし、開発しているシステム上の対数美的曲面でも、拡散反射色の変化の仕方は実物と同様となったが、実物の曲面と一致しなかった。この理由として、環境マップに視線方向からの球状環境マップを用いており、地面側のデータがないために球面調和展開する際に精度が落ちているためだと考えられる。また、視線を変えて映り込みが変化することが、曲面の形状の把握に大きく影響していると考えられる。

6. まとめ

本研究では、以下に表す成果が得られた。

- 1) 実物の対数美的曲面を用いて印象評価実験を行い、環境が曲面の印象に与える影響を明確にした。
- 2) 球面調和解析を用いたレンダリング手法と AR を用いた対数美的曲面創成システムを開発した。

また、今後の課題として以下のようなものが考えられる。

- 1) 現在、本システムを用いて印象評価実験を行うため、環境マップの参照方法の修正中である。

2) 材質によって印象が変わると考えられるため、材質を再現して曲面の印象評価を行う必要がある。

3) 本システムでは一度、対数美的曲面を創成すると変形ができない。リアルタイムに曲面を変形でき、各環境下で最適な印象を得ることができる対数美的曲面を創成できるようにシステムを改善する必要がある。

4) 本システムではヘッドマウントディスプレイに通常の映像を出力しているが、曲面の形状を正確に把握するために、より立体的な表示である立体視にする必要がある。

5) 本研究では、印象評価実験を行った環境が限られている。季節を変えるなど、より様々な環境で評価を行う必要がある。また、どのような環境で対数美的曲面にどのような差異が生じるか、明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 萩原徹, 原田利宣: 対数美的曲面の創成アルゴリズムと VR を用いた曲面創成システムの開発, グラフィクスと CAD 研究会報告, Vol.2009, No.12, pp.13-16(2009)
- 2) 玉垣庸一: ベクトル空間におけるパラメトリック曲面群としてのカラーモデルの表現: コンピュータグラフィクスにおける色立体(1), デザイン学会誌, デザイン学研究特集号, vol.13, No.2, pp.12-15, (2005)
- 3) 権田秀夫, 久誌本琢也, 穂坂衛: 自由曲面上の直交特徴曲線群を用いるハイライト表示および濃淡付けの手法, 情報処理学会第 40 回全国大会講演論文集, pp.517-518, (1990).
- 4) 原田利宣, 吉本富士市, 森山真光: 魅力的な曲線とその創成アルゴリズム, 形の科学学会誌, vol.3, No.3, pp.149-158(1998)
- 5) 井上 治郎, 原田 利宣: 多項式による空間曲線の近似手法とそれを用いた性質分析, グラフィクスと CAD 研究会報告, Vol.2007, No.129, pp.49-54(2007)
- 6) Peter-Pike Sloan, Jan Kautz, John Snyder: Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments, In SIGGRAPH '02: Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.527-536 (2002)
- 7) GREEN, R: Spherical Harmonic Lighting: The Gritty Details, GDC2003 (2003)
- 8) Ravi Ramamoorthi, Pat Hanrahan: An Efficient Representation for Irradiance Environment Maps, In SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.497-500 (2001)
- 9) 加藤博一: 拡張現実感システム構築ツール ARToolKit の開発, 電子情報通信学会研究技術報告, PRMU, pp.79-86(2002)