

拡張現実感を用いた様々な光源環境下における 対数美的曲面の再現に関する研究

平野 亮^{1,a)} 原田 利宣² 床井 浩平²

受付日 2011年10月21日, 採録日 2012年5月12日

概要: 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, 様々な光源環境下 (晴天, 曇天, 夕日) における曲面の印象の違いに関する評価実験を行い, 光源環境が曲面の印象に与える影響を明確にした.

キーワード: 対数美的曲面, 拡張現実感, 印象評価, 事前計算済み放射輝度伝搬

A Study of Simulating Log-aesthetic Curved Surfaces under Various Light Source Environments with Augmented Reality

RYO HIRANO^{1,a)} TOSHINOBU HARADA² KOHE TOKOI²

Received: October 21, 2011, Accepted: May 12, 2012

Abstract: In this study, we developed a simulation system that reproduced the light source environment in a real world with Augmented Reality, and simulated log-aesthetic curved surfaces 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 on the metallic hemisphere in order to reproduce the diffuse reflection of the curved surface. Moreover, we experimented in the impression evaluation of the 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.

Keywords: log-aesthetic curved surface, Augmented Reality, impression evaluation, precomputed radiance transfer

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, デザインのスケッチをもとに CAD システム上で製品の曲面設計 (3D モデル化) が行われ, Virtual Reality (以下, 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, 屋内検討場でハイライトの入り方の確認, 曲率と振率の変化,

曲線面の折れの有無などの評価が行われる. さらに, 屋外検討場においても, 太陽光のもと, クレイモデルの曲面の最終評価が行われる. 加えて, その自動車が他国向け製品であった場合, その国までクレイモデルを輸送し, その光源環境下で評価することもある.

このようにデザイン工程の各段階で曲面の評価が必要となる. そこには, 同じ曲面であってもその曲面の印象が, 周囲の光源環境に依存する映り込み, 陰影, ならびにハイライト位置の影響により異なるという問題があるためである. ここで曲面の印象とは, 映り込み, 陰影, ならびにハイライト位置によりもたらされる同じ曲面でも丸みを感じたり, 平らに感じさせたりする感覚, また曲面上の曲率や

¹ 和歌山大学大学院
Graduate School of Wakayama University, Wakayama 640-8510, Japan

² 和歌山大学
Wakayama University, Wakayama 640-8510, Japan

a) RyoHiranoDSP@gmail.com

振率がスムーズに変化していたり、急峻に変化したりしているように感じる感覚を総称している。具体的な問題として、3D モデルを VR システムで評価し最適であると考えていても、そのデータからクレイモデルを製作し、屋内や屋外で評価した場合、印象が異なる場合がある。その場合、最適な印象を得るために CAD システム上で 3D モデルの微調整を行い、クレイモデルを再度製作し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。よって、CAD システム上で実際に製品が使用される光源環境を考慮して曲面設計する必要があるが、既存の CAD システムでは曲面設計段階で光源環境の影響を完全にシミュレーションし、曲面を設計することは難しい。

次に、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対数美的曲線、対数美的曲面を創成するための研究が行われている [1]。この研究により、CAD システム上で高品質な曲面の創成が可能となり、モデルの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、この一連の研究においても光源環境を考慮した曲面の印象の評価に関する研究は行われておらず、様々な光源環境を考慮して曲面を創成・制御するパラメータの値を最適化することはきわめて困難である。

さらに、3DCG での物体の質感再現 [2] や複雑な光源環境下での物体の放射輝度の再現の研究、曲面の形状を評価する研究 [3] が行われている。しかし、様々な光源環境下で曲面にどのような光源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。以上のことから、CAD システム上で対数美的曲面を創成する際、様々な光源環境下（様々な地域の季節、天候、時間）での曲面の映り込み、陰影、ならびにハイライトをシミュレーションすることが可能となれば、曲面創成に必要なパラメータ値の最適化を行うことができると考えられる。それにより、デザイン工程においても、モデルの製作や評価、3D モデルの修正時間の削減など、多大な工数を削減できる。

そこで、本研究では、拡張現実感の技術を用いて現実空間における光源環境を再現し、光源環境の影響を考慮した対数美的曲面を再現するシステムの開発を行い、樹脂モデルを NC マシンで切削して製作した対数美的曲面（以下、樹脂モデル曲面）とその開発したシステムによって再現された対数美的曲面（以下、CG モデル曲面）の映り込み、ハイライト、陰影の違いを比較し検証する。また、実際にモデルを造形（切削）することなく、様々な光源環境下における対数美的曲面をシミュレーションし評価できる可能性の検証を目的とする。

2. 対数美的曲面とは

本研究で用いられる、対数美的曲面は原田らにより提案された自己アフィン性を有する高品質な曲面である。本章

では、その基本となる曲率・振率対数分布図と対数美的平面曲線、対数美的空間曲線、ならびに対数美的曲面について概説する。

2.1 曲率対数分布図と対数美的平面曲面

美しい平面曲線とは曲線がどのような性質を持つときかを明らかにする分析手法として、原田らにより平面曲線の重要な性質である曲率半径変化の仕方とボリュームを同時に、そして直感的に理解しやすく定量化する方法が開発された [4]。この手法より描かれる図を曲率対数分布図と呼ぶ。曲率対数分布図とは、横軸に曲率半径区間、縦軸に各曲率半径区間に現れる曲線長の割合（以下、長さ頻度）をとるヒストグラムであり、そのヒストグラムの頂点を結んだ線の軌跡を *C curve* と呼ぶ。そして、曲率対数分布図を XY 直交座標系に見立てたとき、*C curve* の傾き α が「曲率半径変化」を、曲率半径区間の最大値と最小値の差がその曲線の「ボリューム」を表す。これらが平面曲線の曲率半径変化に着目した性質となる。

原田らは数多くの自然造形物や工芸品、工業製品の主要断面線やキーライン曲線を分析した結果、*C curve* が直線となること、すなわち、それらの平面曲線が自己アフィン性を有することを明らかにした [5], [6], [7], [8], [9]。ここで、自己アフィン性とは、平面曲線上の任意の 2 カ所の位置で曲線を切って取り出し、その平面曲線を縦横比が異なる任意の倍率に変換（アフィン変換）したときに元の平面曲線と一致する性質のことである [10]。そして、自己アフィン性を持つ曲線が美しい曲線の 1 つであると仮説が立てられ、自己アフィン性を持つ平面曲線を対数美的平面曲線と定義されている。また、吉田、斎藤らによって対数美的平面曲線は一般式化されている [11], [12]。

2.2 対数美的空間曲線

対数美的平面曲線の考え方を空間曲線に拡張して、井上らが振率半径についても曲率対数分布図の手順を応用して振率対数分布図を定義した [13]。この振率対数分布図のヒストグラムの頂点を結んだ軌跡を *T curve* と呼ぶ。*T curve* の傾き β が振率半径変化に着目した空間曲線の性質となる。これら「曲率対数分布図」と「振率対数分布図」により空間曲線の性質を同定することができる。

また、数多くの自然造形物、工業製品、および数学曲線の空間曲線を分析した結果、振率対数分布図の *T curve* も直線となり、振率についても自己アフィン性を有することが示されている [13]。曲率半径変化、振率半径変化についても自己アフィン性を持つ空間曲線が美しい空間曲線であると仮説が立てられ、対数美的空間曲線と定義されている。ここで、空間曲線における自己アフィン性とは、空間曲線上の任意の 2 カ所の位置で曲線を切って取り出し、空間曲線上の各構成点において接線方向、主法線方向、従

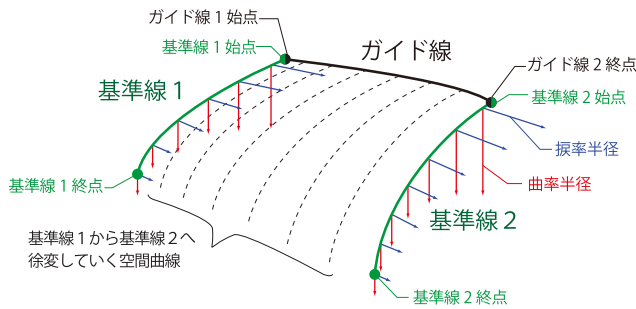


図 1 対数美的曲面の概略図

Fig. 1 Diagrammatic illustration of a log-aesthetic curved surface.

法線方向にそれぞれ異なる倍率でスケールングすることにより元の曲線が得られる性質のことである。

本研究では、吉田らにより提案されたフレネ＝セレの公式を用いた対数美的空間曲線創成アルゴリズム [14] を用いて対数美的空間曲線を創成する。

2.3 対数美的曲面

対数美的曲面とは、対数美的空間曲線の考え方を曲面に拡張して、対数美的空間曲線をもとに創成される曲面である [1]。対数美的曲面は、クレイモデルの製作で用いられている曲面の造形手法をもとにして、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空間曲線を用いて曲面を創成する (図 1)。このとき2本の基準線はガイド線の両端の空間曲線とし、一方の基準線 1 の形を他方の基準線 2 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・振率変化の度合いを表すため、曲率対数分布図を応用した「 γ 曲率対数分布図」、 γ 振率対数分布図のヒストグラムの頂点を結んでできる線を γ_c curve、 γ 振率対数分布図のヒストグラムの頂点を結んでできる線を γ_t curve と呼び、これらが直線となると創成される曲面を対数美的曲面とした。また、 γ_c curve、 γ_t curve の傾きをそれぞれ γ_c 、 γ_t と定義し、これらのパラメータの値を変化させることで対数美的曲面の性質を制御することができる。

ここで、本研究におけるシミュレーション対象に対数美的曲面を用いた理由は、次のとおりである。

- (1) 対数美的曲面は1本のガイド線と2本の基準線からなり、比較的少数のパラメータから曲面を創成することが可能である。
- (2) 対数美的曲面は、B-Spline 曲面などの自由曲面では保証されない自己アフィン性を有し、少数のパラメータ値を変更することで曲面全体の制御が可能であり、様々な形状の曲面を創成することができる。これにより、対数美的曲面を CAD システム上で用いることで、フェアリングの必要がなくなり工業製品の曲面への応

用が期待されている。

- (3) 曲面創成のためのパラメータ値と曲面の印象との関係は未知であり、これを解明することにより、対数美的曲面の CAD システムへの適用の価値が高まる。

ただし、本研究ではパラメータ値と印象との関係の明確化は研究範囲ではなく、その前段階として様々な光源環境下における対数美的曲面をシミュレーションし評価できる可能性の検証を目的とする。

3. 物体の放射輝度の再現

現在まで、複雑な光源環境下において物体の正確な放射輝度を再現する様々な大局照明の手法が考えられてきた。本研究では、現実空間の光源環境下の対数美的曲面の放射輝度を再現するためにリアルタイムに物体の放射輝度を再現できる手法である球面調和解析を用いた事前計算放射輝度伝搬 [15] を用いた。

3.1 事前計算放射輝度伝搬とは

物体の正確な放射輝度を再現するには、光源から放射された光が直接物体に及ぼす影響だけでなく、物体相互の表面間を伝搬して表面上の他の点に影響を及ぼす間接光を考慮する必要がある。しかし、複雑な光の伝搬をリアルタイムに計算することは難しい。そこで事前計算放射輝度伝搬では、計算負荷の大きな処理である物体による遮蔽、相互反射などを事前に計算しておき、レンダリング時にその結果を用いる。ここで、球面調和解析を用いて情報量と計算量を減らし、リアルタイムレンダリングを達成する。

3.2 球面調和解析とは

球面調和解析とは、式 (1) に示す、球面 S 上に定義される任意の関数 $f(s)$ の球面調和基底関数 $y(s)$ による級数展開である。 $\tilde{f}(s)$ は $f(s)$ の正射影である。

$$\tilde{f}(s) = \int c(s)y(s)ds \quad (1)$$

式 (1) において $c(s)$ は展開係数を表し、球面調和基底関数 $y(s)$ は球面 S 上で直交基底である関数である。また、展開係数 $c(s)$ は、式 (2) に示す、球面 S 上に定義される任意の関数 $f(s)$ と球面調和基底関数 $y(s)$ とを畳み込み積分することにより求めることができる。

$$c(s) = \int f(s)y(s)ds \quad (2)$$

球面調和解析により、式 (1) に示すように球面座標上に定義される任意の関数 $f(s)$ を球面調和基底関数 $y(s)$ と展開係数 $c(s)$ の線形和で表すことができ、球面調和射影と呼ぶ。これを用いて、周りの光源環境から入射する光を全方位にわたって球面調和解析し、出射する放射輝度を変調する物体による遮蔽関数も同様に球面調和解析することにより、光源環境の分布と複雑な光の伝搬を単純な線形和で表

することができる。このとき、放射照度に対して支配的な影響を持つ低次の項のみを用い高次の項を捨て去ることにより、保持する情報量と計算負荷を軽減することができる。ただし、この手法において近似の精度を上げようとするれば展開係数の次数を大きくする必要があり、リアルタイムレンダリングへの応用が難しくなる。このため、球面調和解析は輝度分布の変化が急峻な光源環境の近似に適さない。

4. 拡張現実感を用いた対数美的曲面創成システムの開発

本章では、開発したシステムについて述べる。開発したシステムでは、現実空間の光源環境の影響を受けた放射輝度を再現した対数美的曲面を、拡張現実感 (Augmented Reality, 以下 AR) の技術を用いてマークを基準に現実空間を表す映像に重ねて表示することができる。

4.1 球面調和解析を用いたレンダリングアルゴリズム

本節では、開発したシステムに用いているレンダリングアルゴリズムについて述べる。

開発したシステムは、3章で述べた事前計算放射輝度伝搬を用いた。また現実空間の光源環境を撮影した画像を用いることで、3Dモデル化した対数美的曲面の拡散反射光の分布の再現した。ここで、3.2節で述べたように球面調和解析では光の高周波数成分である鏡面反射光を再現することが難しい。そこで、本研究では鏡面反射光を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対数美的曲面の鏡面反射色を再現した。その手順を以下に示す (図 2)。

- (1) レンダリング前に、対数美的曲面の拡散反射光を再現するため、光源環境の全方位を撮影した Light Probe Image を用意し環境マップとする。そして、環境マップを球面調和解析し展開係数を算出する。この展開係数群をライトベクトルと呼ぶ。
- (2) 対数美的曲面の各頂点から、球面上の環境マップ全方位に向かってレイトラシングすることで物体による遮蔽と、任意の最大回数の相互反射を求める。そしてこれらを合わせたものを球面調和解析し展開係数を算出する。この展開係数を伝達ベクトルと呼ぶ。
- (3) レンダリング時に、ライトベクトルと伝達ベクトルの線形和を求めることで対数美的曲面の正確な拡散反射光を算出する。
- (4) 金属半球に反射した光源環境を撮影して画像として取得し、球状環境マッピングすることで鏡面反射光を再現する。
- (5) 拡散反射色と鏡面反射光をフルネルの式を用いて合成することで対数美的曲面の放射輝度を求める。

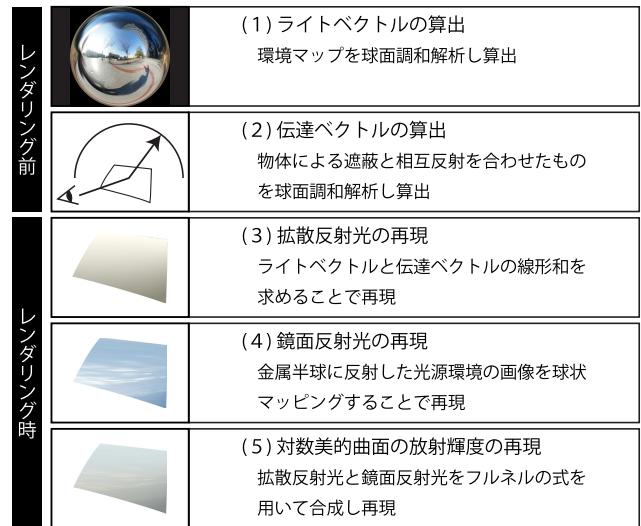


図 2 球面調和解析を用いたレンダリングアルゴリズムのフロー
Fig. 2 Flow of rendering by using spherical harmonics analysis algorithm.

4.2 AR を用いた対数美的曲面創成システムの開発

開発したシステムは、ARToolkit [16] を用いた AR の技術によって現実空間で自由に視点を変更しながらに 3D モデル化した対数美的曲面を評価することができる。開発したシステムの具体的な流れは次のとおりである。まず、対数美的曲面を 3D モデル化する。次に、ヘッドマウントディスプレイに使用者の視線方向と一致するよう Web カメラを装着し視線方向の映像をカメラで撮影する。撮影した映像の中から、対数美的曲面の 3D モデルを表示する位置の基準となるマークを検出する。次に、マーク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対数美的曲面の 3D モデルにするためにモデル変換を行う。このとき、マーク内部に金属半球を設置することでマークを検出するとともに金属半球に反射した周囲の光源環境を取得し、鏡面反射光再現に用いる。さらに、4.1 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対数美的曲面の 3D モデルを現実空間の映像に重ねて表示する (図 3)。ユーザはヘッドマウントディスプレイを通して、現実空間の映像に重ねて対数美的曲面の 3D モデルを自由な視点から見るができる。

5. 様々な光源環境下における対数美的曲面の印象に関する評価実験

光源環境による対数美的曲面の印象の違いを明確にするために、対数美的曲面の印象に関する評価実験を行った。この実験では、対数美的曲面の映り込み、ハイライト、陰影がどのようにつき、そこからどのような印象を受けるか評価を行った。まず、樹脂モデル曲面を用いて評価実験を行い、次に CG モデル曲面を用いて同様の実験を行った。最後に、2つの実験結果を比較した。



図 3 開発したシステムを用いた評価実験の風景

Fig. 3 Scene of the evaluation experiment with the developed system.

表 1 評価実験に用いた対数美的曲面のパラメータ値

Table 1 Parameters of a log-aesthetic curved surface for the evaluation experiment.

	始点曲率半径	終点曲率半径	α
基準線 1	1500	100	0.666
基準線 2	1000	200	-0.666
ガイド線	5000	4900	2.0
	始点振率半径	終点振率半径	β
基準線 1	1500	250	0.1
基準線 2	1000	200	0.1
ガイド線	10000	9900	2.0
	γ_c	γ_t	
	1.0	1.0	

5.1 樹脂モデル曲面を用いた評価実験

樹脂モデル曲面を用いて、複数の光源環境下で評価実験を行った。樹脂モデル曲面には、自動車などの工業製品でクレイモデルの評価に用いられる塗装を施したようにできるダイノックフィルムを貼った。表 1 に示すパラメータ値を用いて NC マシンにより製作した樹脂モデル曲面を使って、光源環境が異なる天候と時間を変え、時期は 2011 年 1 月上旬に和歌山大学システム工学部前で、天気（晴れ、曇り）と時間（昼、夕）の光源環境下で評価実験を行った。天気が曇りの日は、1 日を通して雲により太陽光が遮蔽され時間による光源環境の変化が少ないため昼のみの実験とした。各光源環境下の樹脂モデル曲面のサイドビュー、フロントビュー、アイソメトリックビューの写真を図 4 に示している。各光源環境ごとの実験結果を以下に示す。以下、主曲率（の一方）が大きき値を持つ曲面上の領域を曲がり具合が大きい領域とし、小さな値を持つ曲面上の領域を曲がり具合が小さい領域とする。

晴れ（昼）：曲面の曲がり具合が小さい領域（図 4 の A 部分）では、太陽光の強い光が曲面の法線方向に対して小さい角度で入射するためハイライトが入った。そのため、曲面の曲がり具合が小さい領域では白くなり陰影がつかなかった。一方で、曲面の曲がり具合が大きい領域（図 4 の B 部分）では陰影がしっかりとついた。曲面の曲がり具合が小さい領域では陰影が

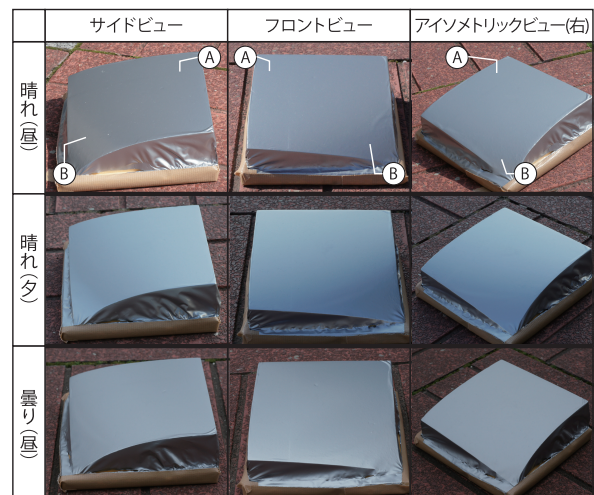


図 4 樹脂モデル曲面を用いた評価実験の結果

Fig. 4 Results of the evaluation experiment by using a log-aesthetic curved surface's resin model.

かず平面的に見え、曲がり具合が大きい部分でより丸みが強調された。曲面全体として、ある位置から急峻に丸みが強くなっている印象となった。

晴れ（夕）：太陽が地平線に沈み始め太陽の光が弱くなり空全体にグラデーションがかかり、それらが曲面に映り込むため曲面全体に満遍なく陰影ついた（図 4 の A から B に方向）。そのため、他の光源環境に比べ曲面全体の丸みが強調された印象となった。

曇り（昼）：太陽の光が雲に遮られ弱い光が一様に曲面全体に映り込み陰影がほとんどつかなかった。そのため、曲面全体として平面的な印象となった。

同じ曲面であっても、3つの光源環境下において曲面から与えられる印象が異なった。陰影がつくことで曲面の丸みがより強調された印象になったと考えられる。また、曇りの日を除き光源環境全体より太陽の光の影響が強く出ているため、太陽の位置や光の入射角も曲面の印象に大きく影響していると考えられる。

5.2 CG モデル曲面を用いた評価実験

開発したシステムを用いて 5.1 節の樹脂モデル曲面を用

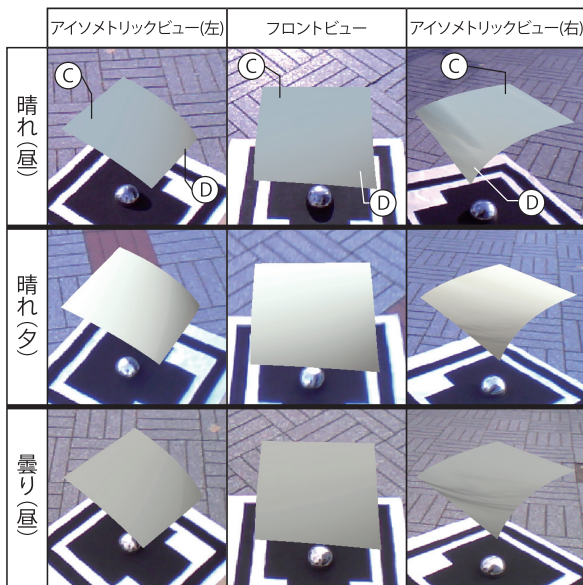


図 5 CG モデル曲面を用いた評価実験の結果

Fig. 5 Results of the evaluation experiment by using a log-aesthetic curved surface with developed system.

いた評価実験と同様の光源環境を再現し、評価実験を行った。実験に用いた CG モデル曲面は、5.1 節の評価実験で用いた樹脂モデル曲面と同様に表 1 に示すパラメータ値を用いて創成した。各光源環境下の CG モデル曲面の左側から見たアイソメトリックビュー、フロントビュー、および右側から見たアイソメトリックビューの画像を図 5 に示す。そして、各光源環境ごとの実験の結果を以下に示す。

晴れ (昼) : 曲面の曲がり具合が小さい領域 (図 5 の C 部分) では、空の薄青色が強く映り込み陰影がつかなかった。また、曲面の曲がり具合が大きい領域 (図 5 の D 部分) では、大学の校舎が一部写り込むため曲がり具合が大きい領域の方向へ薄青色から赤みがかった色へ変化し、陰影がついた。

晴れ (夕) : 曲面の曲がり具合が小さい領域から大きい領域 (図 5 の C から D 方向) に向けて曲面全体で陰影が変化した。他の 2 つの光源環境に比べて陰影の変化が大きく、特に曲面の曲がり具合が大きい領域 (図 5 の D 部分) での陰影の変化が大きくなった。全体で陰影が変化しているので、他の光源環境と比べて丸み強い印象となった。

曇り (昼) : 曲面全体がほぼ単一色で再現され、陰影が肉眼ではほとんど識別されなかった。このため、曲面全体が平面的な印象となり、ほとんど丸みを感じることができなかった。また、視点を大きく変え映り込んでいる周囲の建物の像が変化することで曲面の丸みを感じることができた。

開発したシステムを用いた評価実験の様子は、下記 URL に動画として用意している。

http://www.sys.wakayama-u.ac.jp/~harada/ar_surface

5.3 樹脂モデル曲面と CG モデル曲面の比較

樹脂モデル曲面と CG モデル曲面の評価実験の結果の比較を行った。樹脂モデル曲面は太陽光が強く影響し、CG モデル曲面は光源環境全体の影響が強く、特に映り込みが強く影響した。このため、色相は一致しなかったが、各光源環境で樹脂モデル曲面と CG モデル曲面は陰影の変化の仕方は同様となった。さらに、各光源環境における比較結果を以下に示す。

晴れ (昼) : CG モデル曲面は空の色の映り込みが強く影響され全体が青みがかり暗い色になったが、樹脂モデル曲面は太陽光の影響を強く受け非常に明るくなった。陰影の変化の仕方は、樹脂モデル曲面と CG モデル曲面ともに、曲面の曲がり具合が小さい領域で陰影の変化がほとんどない単一色となり (図 4 の A 部分、図 5 の C 部分)、曲面の曲がり具合が大きい領域ではともに陰影が大きく変化した (図 4 の B 部分、図 5 の D 部分)。

晴れ (夕) : 樹脂モデル曲面に比べ CG モデル曲面は空の夕焼け色が強く影響し赤みがかった。また、陰影の変化の仕方は、樹脂モデル曲面と CG モデル曲面ともに陰影の変化が大きく最も丸み強い印象となった。

曇り (昼) : CG モデル曲面は樹脂モデル曲面に比べ全体が暗い灰色となった。また、陰影の変化の仕方は、樹脂モデル曲面と CG モデル曲面ともに全体が単一色になり陰影がなかった。

5.4 輝度ヒストグラムを用いた CG モデル曲面の陰影の再現性の検証

CG モデル曲面の陰影の変化の再現性を、輝度ヒストグラムを用いて検証した。輝度ヒストグラムとは、画像の輝度 (明暗の度合い) の分布を表したグラフであり、横軸が輝度値、縦軸が画素数を表し、横軸の左側が暗い画素、右側が明るい画素を表す。そこで、輝度ヒストグラムの変化の仕方を、樹脂モデル曲面と CG モデル曲面で比較することで陰影の変化の仕方の再現性を検証した。具体的には、各光源環境の樹脂モデル曲面の図 4 の A 部分から B 部分、陰影の再現性を検証するため鏡面反射光成分を除いた CG モデル曲面における図 5 の C 部分から D 部分の曲面対角線上の画素 (横 30 ピクセル × 縦 600 ピクセル) を抽出し、Adobe Photoshop CS 5.5 を用いて抽出した画素の輝度ヒストグラムを求め比較した。このとき、樹脂モデル曲面の画像はカメラ種類、設定により印象が異なるため、人間の目に近い High Daynamic Range を用いて曲面の陰影の変化が最も分かりやすい状態で撮影した画像を分析に用いた。比較を行った結果を以下に示す (図 6)。

晴れ (昼) : 樹脂モデル曲面と CG モデル曲面ともに、輝度値差が比較的小さい範囲で、輝度値が大きくなる方向に画素数が急峻に増加した。

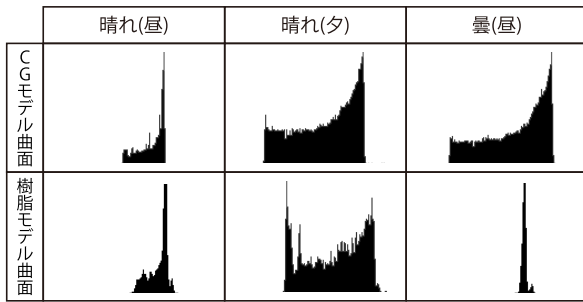


図 6 CG モデル曲面と樹脂モデル曲面の輝度ヒストグラム

Fig. 6 Luminance histograms of a log-aesthetic curved surface with developed system and a log-aesthetic curved surface's resin model under various environments.

晴れ (夕)：樹脂モデル曲面と CG モデル曲面ともに、輝度値差が比較的大きい範囲で、輝度値が大きくなる方向に画素数が増加した。しかし、樹脂モデル曲面ではノイズが入り、輝度値の小さい部分でも画素数も大きくなった。

曇り (昼)：樹脂モデル曲面と CG モデル曲面で、輝度ヒストグラムが異なった。樹脂モデル曲面は、曲面全体が単一色なため、一部の輝度値で画素数が大きくなった。一方で、CG モデル曲面は図 5 において、一見すると単一色に見えたが、輝度ヒストグラム上では微細な陰影の変化をしていた。

5.5 考察

樹脂モデル曲面と CG モデル曲面で、それぞれ光源環境で曲面が与える印象の違いを確認することができた。輝度ヒストグラムの比較では、晴れ (昼)、晴れ (夕) の光源環境下で陰影の変化を十分に再現できたといえる。しかし、曇りの光源環境下では輝度ヒストグラムが大きく異なり、陰影の変化を再現することができなかった。これは、CG モデル曲面が樹脂モデル曲面に用いたダイノックフィルムの材質を考慮していないため、曇りの日の弱い光の光源環境下では材質による表面の光の乱反射の影響が大きく再現できなかったと考えられる。また、CG モデル曲面と樹脂モデル曲面間での色相は完全には一致しなかったが、晴れ (昼)、晴れ (夕) の光源環境下で陰影の変化の仕方を一致させることができた。つまり、CG モデル曲面において各光源環境で曲面の印象の違いを確認できるほど放射輝度の再現に差を出すことができたと考える。さらに、CG モデル曲面において陰影がつかない曇りの日でも、視点を変え、映り込む像の変化を見ることで曲面の曲がり具合を確認することができた。

これらのことから、色相不一致の問題、材質の問題を解決することによって、開発したシステム上で現実空間の光源環境下と同様に対数美的曲面を評価することができるという可能性を示せたと考える。

6. まとめ

本研究では以下に示す成果が得られた。

- (1) 光源環境の影響を考慮した対数美的曲面を創成するシステムを開発した。
- (2) 樹脂モデルを NC マシンで切削して製作した対数美的曲面と開発した AR システムを用いて印象評価実験を行い、光源環境が曲面の印象に与える影響を明確にした。
- (3) 開発した AR システムによって、現実空間の光源環境下と同様に対数美的曲面を評価することができるという可能性を示すことができた。

今後の課題として以下のようなものがあげられる。

- (1) 本研究では、樹脂モデル曲面と CG モデル曲面間での、曇りの光源環境下の陰影の変化と各光源環境下での色相が一致しなかった。これらの問題は、CG モデル曲面の放射輝度の再現に物体の材質が考慮されていないことが原因と考えられ、正確な CG モデル曲面の放射輝度を再現できるようにシステムを改良する必要がある。
- (2) 本研究では、印象に関する評価実験を行う光源環境が限られていた。今後は、季節が異なる様々な光源環境下において実験を行い、各光源環境での対数美的曲面の印象を明らかにする必要がある。
- (3) 現在、筆者らは対数美的曲面の制御パラメータと曲面形状やその映り込み形状との関係の明確化を進めている [17]。その結果、パラメータによっては曲面の形状に大きな影響を与えることが明らかとなった。今後、さらに研究を進め、制御パラメータと曲面の印象との関係についても解明し、その結果と本研究での成果を融合することにより、様々な光源環境下で目的とする印象を得るための制御パラメータ値を示唆することのできる造形支援システムへと発展させたい。

謝辞 本研究の一部は科学研究費 (基盤研究 (B) No. 23300034) によった。ここに謝意を表す。

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] 田中法博, 望月宏祐, Woo, J.: 日本刀の光沢・形状計測に基づいた 3DCG 再現—日本刀の 3 次元デジタルアーカイフ, 日本デザイン学会研究発表大会概要集, Vol.57, pp.146-147 (2010).
- [3] 渡辺由美子, 齊藤 剛, 東正 毅: 曲面稜線による美的意匠曲面の解析, 情報処理学会誌, Vol.40, No.2, pp.702-709 (1999).
- [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] 原田利宣, 中嶋信幸, 栗原裕介, 吉本富士市: 自然造形

- 物・工芸品における曲線の分析, デザイン学研究, Vol.47, No.3, pp.29–38 (2000).
- [6] Yoshimoto, F. and Harada, T.: Analysis of the characteristics of curves in natural and factory products, *Proc. 2nd IASTED International Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing*, pp.276–281, ACTA Press (2002).
- [7] 原田利宣, 吉本富士市: 日本刀における曲線の性質分析, デザイン学研究, Vol.51, No.1, pp.77–84 (2004).
- [8] 原田利宣, 吉本富士市: CURVES IN NATURAL AND FACTORY PRODUCTS, *Bulletin of Japanese Society for the Science of Design*, Vol.50, No.3, pp.55–62 (2003).
- [9] 井上治郎, 原田利宣, 今井敏行: 自然造形物・工芸品における曲面の曲率線抽出とその性質分析, デザイン学研究, Vol.54, No.3, pp.39–46 (2007).
- [10] 原田利宣, 森 典彦, 杉山和雄: 曲線の物理的性質と自己アフィン性, デザイン学研究, Vol.42, No.3, pp.33–40 (1995).
- [11] 吉田典正, 斎藤隆文: 美しい曲線の全体像解明と対話的制御, *Visual Computing/グラフィクスとCAD 合同シンポジウム*, Vol.2006, pp.72–82 (2006).
- [12] Yoshida, N. and Saito, T.: Interactive Aesthetic Curve Segments, *The Visual Computer (Pacific Graphics)*, Vol.22, No.9–11, pp.896–905 (2006).
- [13] 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).
- [14] 吉田典正, 斎藤隆文: 美的空間曲線の全体像の解明, *情報処理学会グラフィクスとCAD 研究会*, Vol.2007, No.111, pp.56–60 (2007).
- [15] Sloan, P., Jan, K. and John, S.: Precomputed Radiance Transfer for Real-time Rendering in Dynamic, Low-Frequency Lighting Environments, *ACM Trans. Graphics (TOG)–Proc. ACM SIGGRAPH 2002*, Vol.21, No.3, pp.527–536 (2002).
- [16] 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*, Vol.101, No.652, pp.79–86 (2002).
- [17] 平野 亮, 原田利宣: 対数美的曲面における制御パラメータの映り込み形状への影響, *情報処理学会グラフィクスとCAD 研究会*, Vol.2012-CG-146, No.32, pp.1–5 (2012).



平野 亮 (学生会員)

平成 22 年和歌山大学システム工学部卒業。現在, 同大学院システム工学研究科博士前期課程在学中。AR, VR を用いた曲面に関する研究に従事。



原田 利宣 (正会員)

平成 8 年千葉大学大学院自然科学研究科修了。博士 (工学)。日産自動車 (株) デザイン本部を経て, 平成 9 年和歌山大学システム工学部助教授。平成 16 年同教授, 現在に至る。曲線・面, デザイン方法論等の研究に従事。

1996 年日本デザイン学会研究奨励賞受賞, 2004 年グッドデザイン賞受賞, 2002, 2004, 2005, 2010 年感性工学会出版賞等。



床井 浩平 (正会員)

昭和 61 年豊橋技術科学大学大学院工学研究科情報工学系修士課程修了。同年和歌山大学経済学部助手。平成 8 年和歌山大学システム工学部助教授。平成 19 年同准教授。博士 (工学)。コンピュータグラフィックス等の研究に従事。

電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, ACM 各会員。