

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

平野亮[†] 原田利宣^{††}

曲面の印象は、周囲の光源環境と曲面形状に依存する映り込みに影響される。しかし、曲面の映り込みを意図的に制御することは難しく、デザイナーの経験や勘により曲面を調整し探索的に最適な映り込みを得ている。そこで本研究では、高品質な曲面である対数美的曲面を用いて、ゼブラパターンの曲面への映り込みが、対数美的曲面を制御するパラメータを変化させることでどのように変化するかシミュレーションを行うことを目的とした。また、その結果から対数美的曲面における制御パラメータと映り込み形状との関係を明らかにした。

Influences of parameters generating a log-aesthetic curved surface on specular reflection form

Ryo Hirano[†] Toshinobu Harada^{††}

The impression of a curved surface is influenced by specular reflection form on the curved surface depending on the light source environment and form of the curved surface. However, it is too difficult for a designer to control specular reflection form on the curved surface. Accordingly, a designer must search optimal specular reflection form by adjusting form of the curved surface gradually using their intuition and experience. Therefore, the purpose of this study is to simulate how the reflections of zebra pattern images on log-aesthetic curved surfaces (high-quality curved surface) are changed by varying parameters generating the log-aesthetic curved surface. As a result, we clarified the relations between specular reflection forms on the curved surfaces and the parameters.

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 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、屋外検討場で曲面の評価が行われる。各評価において、デザイナーは曲面表面に映り込む周囲の光源環境の反射像の形状 (以下、映り込み形状と呼ぶ) や映り込み形状の一部であるハイライト (照明や太陽光が曲面表面に映り込んだ反射像) の位置や形状から曲面形状の評価を行う。ここで、物体に映り込むハイライトの入り方の違いにより知覚される表面反射特性が異なること¹⁾、物体に映り込むハイライトの位置や形状により知覚される物体の形状が異なること²⁾から、デザイナーが意図する曲面を得るには光源環境ごとに曲面形状を制御し最適な映り込み形状を設定する必要がある。しかし、周囲の光源環境や曲面形状により異なる映り込み形状を意図的に制御することは難しく、デザイナーは勘や経験により曲面形状を調整し探索的に意図する映り込み形状を得ている。この場合、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。また、任意のハイライト位置を指定して高品質な曲面を創成する研究が行われている³⁾。しかし、この研究で扱われている曲面は一次曲面であり、自動車などの工業製品に用いられる複雑な曲面に適応されていない。

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⁴⁾。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った。しかし、この一連の研究においても映り込み形状と対数美的曲面を創成・制御するパラメータ (以下、制御パラメータ) の関係性に関する研究は行われておらず、映り込み形状を考慮しての制御パラメータを最適化することは極めて困難である。

そこで本研究では、対数美的曲面を用いて、ゼブラパターンの曲面への映り込みが、対数美的曲面の制御パラメータを変化させることでどのように変化するかシミュレーションを行い、その結果から対数美的曲面の制御パラメータと映り込み形状との関係を明らかにすることを目的とする。

[†] 和歌山大学大学院
Graduate School of Wakayama University

^{††} 和歌山大学
Wakayama University

2. 対数美的曲面とは

本章では、対数美的曲面の基本となる曲率・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線

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。本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⁾。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⁷⁾。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⁷⁾。

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^{8), 9)}。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¹⁰⁾。曲率半径変化、振率半径変化について共に自己アフィン性を持つ空間曲線を美しい空間曲線という仮説を立てられ、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、従法線方向にそれぞれ異なる倍率でスケールリングすることにより元の曲線もしくはその一部が得られる性質のことである。

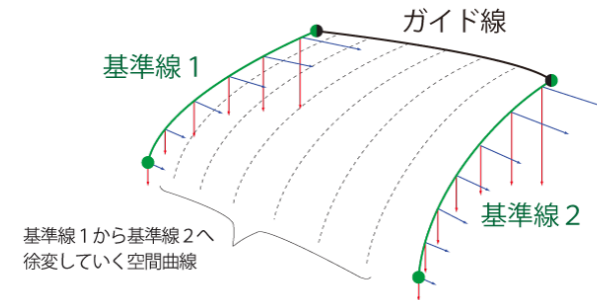


図1 対数美的曲面概略図

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¹¹⁾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、対数美的曲面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⁴⁾。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」を定義した。この γ 曲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 γc 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 γt curve と呼び、これらが直線となるとき創成される曲面を対数美的曲面とした。また、 γc curve、 γt curve の傾きをそれぞれ γc 、 γt と定義し、これらの制御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。

3. ゼブラパターンを用いた映り込み曲線の分析

本章では、ゼブラパターンの映り込みから、映り込んだ曲線の性質をみることで、対数美的曲線の制御パラメータ(基準線1の α , β 、基準線2の α , β)の映り込み形状への影響を分析した手法と分析結果、ならびにその考察を述べる。また、曲面の映り込み形状は視点により大きく異なり、すべての視点において分析することは困難である。そこで、本研究では曲面を評価される際に最も重要視されるアイソメトリックビューに視点を設定して、その視点での映り込み形状の分析を行った。

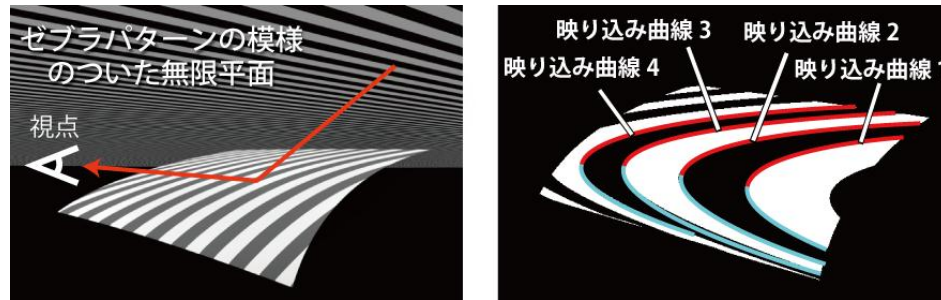


図 2 ゼブラパターンの反射像と映り込み曲線

3.1 分析概要

ゼブラパターンのついた無限平面を対数美的曲面表面に反射させ、対数美的曲面表面の鏡面反射像からゼブラパターン模様の輪郭線の曲線を抽出し、対数美的曲面に映り込んだ曲線（以下、映り込み曲線と呼ぶ）の性質から、制御パラメータの映り込み形状への影響の分析を行った（図 2 左）。以下に分析の手順を示す。

- (1) 対数美的曲面を創成し、ゼブラパターン模様がついた無限平面を対数美的曲面表面に反射させ、曲面表面の鏡面反射像を取得する。
- (2) 鏡面反射像の中から映り込み曲線を抽出する。
- (3) 抽出した映り込み曲線を最大曲率の部分で 2 つに分割する。分割した映り込み曲線は、対数美的曲面の知覚される形状に影響の大きいガイド線側の曲線を分析に用いる（図 2 右）。
- (4) 分割した映り込み曲線を多項式近似し、曲率対数分布図を描画する。
- (5) 対数美的曲面の制御パラメータの値を変更し、(1)~(4)を繰り返す。

また、映り込み曲線は抽出可能な数だけ最大 4 本抽出し、基準線 2 側から基準線 1 方向へ順番に映り込み曲線 1 から映り込み曲線 4 とした（図 2 右）。

3.2 ゼブラパターンを用いた映り込み曲線の分析結果

16 組の対数美的曲面の制御パラメータの値の組み合わせ（表 1）を用いて対数美的曲面を創成し、その対数美的曲面の映り込み曲線 1 から映り込み曲線 4 の曲率対数分布図を描画した。そして、描画したそれらの曲率対数分布図を既に体系化されている 6 タイプ³⁾の中から 4 タイプ、それらに含まれない曲率半径が小さい方から大きい方へかけて定速型から発散型に変化するものを定速発散型として定義し、計 5 タイプへ同定した（図 3）。その結果、定速型と収束型になるサンプルは少なく、定速発散型や発散型のサンプルが多かった。

表 1 制御パラメータの組み合わせ

サンプル	基準線 1		基準線 2	
	α	β	α	β
1	+1.0	+1.0	+1.0	+1.0
2	-1.0	+1.0	+1.0	+1.0
3	+1.0	-1.0	+1.0	+1.0
4	+1.0	+1.0	-1.0	+1.0
5	+1.0	+1.0	+1.0	-1.0
6	-1.0	-1.0	+1.0	+1.0
7	-1.0	+1.0	-1.0	+1.0
8	-1.0	+1.0	+1.0	-1.0
9	+1.0	-1.0	-1.0	+1.0
10	+1.0	-1.0	+1.0	-1.0
11	+1.0	+1.0	-1.0	-1.0
12	-1.0	-1.0	-1.0	+1.0
13	-1.0	-1.0	+1.0	-1.0
14	-1.0	+1.0	-1.0	-1.0
15	+1.0	+1.0	+1.0	+1.0
16	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

表 2 映り込み形状の移動距離

変更するパラメータ	最大移動距離	平均移動距離	移動方向
基準線 1 α	0.2236	0.0724	(-, -)
基準線 1 β	0.3583	0.1287	(+, +)
基準線 2 α	0.123	0.1563	(-, -)
基準線 2 β	0.3563	0.1033	(+, +)
γ_c	0.1388	0.0406	(-, -)
γ_t	0.0234	0.0071	(+, +)

曲率対数分布図	映り込み曲線 1	映り込み曲線 2	映り込み曲線 3	映り込み曲線 4	
発散型 	サンプル 4 サンプル 6 サンプル 11	サンプル 4 サンプル 11 サンプル 13	サンプル 4 サンプル 11 サンプル 16	サンプル 1 サンプル 13 サンプル 4 サンプル 16 サンプル 7	
定速型 	該当なし	サンプル 2 サンプル 14	サンプル 14	該当なし	
収束型 	サンプル 1 サンプル 9	サンプル 1	サンプル 1 サンプル 6	サンプル 2	
山型 	サンプル 3 サンプル 15	サンプル 3 サンプル 5 サンプル 8 サンプル 9 サンプル 12 サンプル 15	サンプル 2 サンプル 3 サンプル 5 サンプル 8 サンプル 12 サンプル 15	サンプル 3 サンプル 5 サンプル 6	
定速発散型 	サンプル 2 サンプル 5 サンプル 7 サンプル 8 サンプル 10	サンプル 12 サンプル 13 サンプル 16 サンプル 14	サンプル 6 サンプル 7 サンプル 10 サンプル 16	サンプル 7 サンプル 10 サンプル 13	該当なし

図 3 映り込み曲線の曲率対数分布図の分類

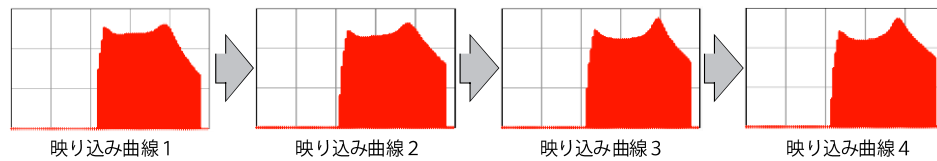


図 4 サンプル 3 の映り込み曲線の曲率対数分布図の遷移

3.3 考察

前節で行った分析結果の考察を以下に示す。

- 映り込み曲線 1 から映り込み曲線 4 への曲率対数分布図の変化は、サンプル 6 を除き連続的に変化した (図 4)。つまり、ある曲面における映り込み曲線は映り込み曲線 1 から映り込み曲線 4 において、似た曲線の性質を有した。このため、映り込み曲線ごとに性質を制御することは難しいと考えられる。
- 基準線 1 の α , β の値が同じ符号であるとき、基準線 2 の α , β のどちらかが -1.0 である場合、映り込み曲線全体が発散型になる傾向があった。
- 映り込み曲線 1 において、基準線 1 の α が -1.0 のときは定速発散型になった。他のタイプを得るには、 α を $+1.0$ にする必要がある。
- 映り込み曲線 2 において、制御パラメータ値の組み合わせにより、同じの制御パラメータ値を変更しても曲率対数分布への影響は異なった。映り込み曲線 2 は、曲面中央に位置しており各制御パラメータが複雑に影響しており制御することは困難であると考えられる。
- 映り込み曲線 3 において、基準線 2 の α , β が $+1.0$ の場合、曲率対数分布図は収束型が多く、 -1.0 の場合、曲率対数分布図は発散型が多かった。したがって、映り込み曲線 3 は基準線 2 の制御パラメータの影響が大きいと推察される。
- 映り込み曲線 4 において、制御パラメータに関係なく曲率対数分布図は発散型が多かった。

以上のことより、映り込み曲線 1 から映り込み曲線 4 において似た曲線の性質を持つため、制御することが可能な映り込み曲線 3, 映り込み曲線 4 の性質を制御することで映り込み形状全体を制御することが可能であると考えられる。

4. チェスボードパターンを用いた映り込み形状の分析

本章では、チェスボードパターンの映り込みを用いて対数美的曲線の制御パラメータの映り込み形状への影響を分析する手法と分析結果、ならびに考察を述べる。また、前章と同様にアイソメトリックビューに視点を設定して、その視点での映り込み形状の分析を行った。



図 5 チェスボードパターンの映り込みを用いた分析フロー

4.1 分析概要

チェスボードパターンを対数美的曲面上に反射させ、制御パラメータを変更したときにその反射像の画面上ピクセル位置が移動した距離 (以下、移動距離と呼ぶ) や方向を求め、任意の視点位置から見た対数美的曲面上の映り込み形状がどのように移動か制御パラメータの影響を分析した。分析の手順を以下に示す (図 5)。

- (1) 対数美的曲面を創成し、各マスに色を指定したチェスパターン模様がついた無限平面を対数美的曲面表面に反射させ、鏡面反射像を取得する。
- (2) 鏡面反射像の中から任意の色のマスを抽出する。
- (3) 抽出したマスの画面上のピクセル位置を取得する
- (4) 対数美的曲面の制御パラメータを変更して(1)~(3)を繰り返す。
- (5) 抽出したマスのピクセル位置を追跡し、ピクセルの差をマスの移動距離、画面左上を原点とした右横方向を x 軸の+方向、下方向を y 軸の+方向とした移動方向を求める。

また、移動距離を用いて、制御パラメータを変化させ前後で抽出したマスの中で移動した直線距離をガイド線の曲線長で割った値が最大となるもの最大移動距離、抽出した各マスの移動した直線距離の合計を抽出したマスの数で割った平均移動距離を算出した。

4.2 チェスボードパターンを用いた映り込み形状分析結果

対数美的曲面の制御パラメータは初期値をすべて 0.0 に設定し、6 つの制御パラメータ (基準線 1 の α , β , 基準線 2 の α , β , γ_c , γ_t) をそれぞれ -1.0 から $+1.0$ に値を変化させチェスボードパターンの抽出した最大移動距離と平均移動距離ならび移動方向を算出した。その結果を以下に示す (表 2)。

- 1) 最大移動距離は、基準線 1, 基準線 2 の β を変化させたとき値が大きくなる、
- 2) 平均移動距離は基準線 1 の β と基準線 2 の α を変化させたとき値が大きくなる。

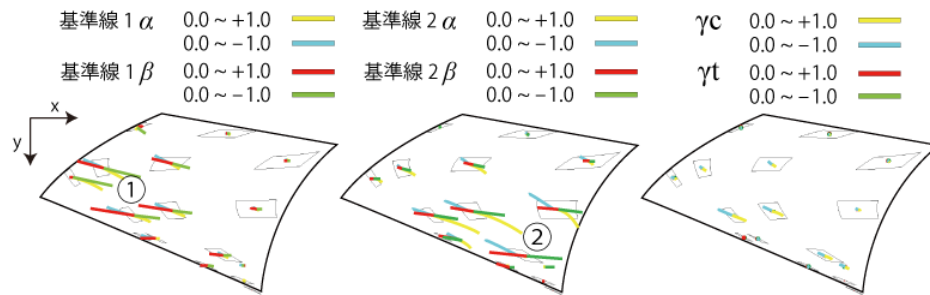


図 6 映り込み形状の移動の軌跡

- 3) γc , γt を変化させたとき, 最大移動距離, 平均移動距離ともに値は小さい.
- 4) 曲率を制御するパラメータ (α , γc) と, 振率を制御するパラメータ (β , γt) で抽出したマスの移動は反対向きになる.

次に, 抽出した各マスの移動の軌跡を求め, 各制御パラメータが対数美的曲面表面のどの位置の映り込み形状に影響するか分析した (図 6).

- 1) 基準線 1 の α , β を変更した場合, 図 6 の①付近での移動の変化が大きい.
- 2) 基準線 2 の α , β を変更した場合, 図 6 の②付近での移動の変化が大きい.
- 3) ガイド線付近での移動はみられない.

4.3 考察

前節で行った分析結果の考察を以下に示す.

- 変更する制御パラメータにより映り込み形状が移動する対数美的曲面表面上の位置が異なるため, 対数美的曲面表面上の任意の位置の映り込み形状を変更することが可能である.
- 本研究では, 対数美的曲面の法線方向と視点方向がほぼ同方向である図 6 の①や②付近の映り込み形状の変化が大きく, 視点方向とは大きく異なる法線方向を持つガイド線付近の映り込み形状の変化が小さかった. 今後, 動的に視点を変更して面の法線方向と視点の関係を分析する必要がある.
- γc , γt の値の変更による映り込み形状の移動距離は小さいが, 基準線 1, 基準線 2, ならびにガイド線を変更することなく映り込み形状を移動させることができるため, 最終的な映り込み形状の調整などに用いることができる.

5. まとめ

本研究では, 以下の成果が得られた.

- 1) ゼブラパターンを用いた映り込み曲線の分析を行い, 映り込み曲線への制御パラメータと影響を確認することができた.
- 2) チェスボードパターンを用いた映り込み形状の分析を行い, 対数美的曲面の制御パラメータによる移動する映り込み形状の対数美的曲面表面上の位置への影響が明確となった.
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) 本研究では, 制御パラメータの組み合わせや視点の位置が限られていた. 今後は, 異なった制御パラメータの組み合わせや視点位置から分析を行い, 制御パラメータと映り込み形状の関係を明らかにする必要がある.
- 2) 本研究で行った分析結果を元に, 制御パラメータと映り込み形状の関係を定式化し映り込み形状を制御可能にする必要がある.

参考文献

- 1) Nishida, S. and Shinya, M.: Use of image-based information in judgments of surface-reflectance properties. J Opt Soc Am A, Vol. 15, pp. 2951-2965 (1998).
- 2) 井上浩義: 陰影とハイライトの大きさと位置が奥行き知覚に及ぼす効果, 熊本大学学術リポジトリ, 熊本大学社会文化研究, vol.5, pp23-28 (2007).
- 3) 小松 祐介, 青山 英樹: ハイライト曲線を用いた形状モデリングシステム, デザイン学研究, 研究発表大会概要集, vol.53, pp.302-303 (2006).
- 4) 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).
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) Yoshida, N. and Saito, T.: Interactive Aesthetic Curve Segments, The Visual Computer (Pacific Graphics), Vol.22, No.9-11, pp.896-905 (2006).
- 8) 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).
- 9) 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).
- 10) Inoue, J., Harada, T. and Hagihara, T.: An Algorithm for Generating Log-Aesthetic Curved Surfaces and the Development of a Curved Surfaces Generation System using VR. IASDR2009 proceedings (CD-ROM), pp. 2513-2522 (2009).
- 11) 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).