

平成 27 年 6 月 7 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23300034

研究課題名(和文)照明・反射による見栄えを包括的に考慮した曲面形状理論の創生

研究課題名(英文)Curved Surface Theory based on Appearance by Lighting and Reflection

研究代表者

齋藤 隆文(SAITO, Takafumi)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60293007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、CGや意匠デザインで用いる曲面形状を、鏡面・拡散反射による見栄えを包括的に考慮して生成・制御することを目的としたものである。鏡面反射による良好な映り込み形状を得るための、対数美的曲面の形状パラメータに関する知見を得るとともに、対話的制御法を提案した。また、より理想的な曲面集合として、完全対数美的曲面を提案した。アニメ調描画で用いる、拡散反射とセルシェーディングによる段階的陰影形状に関して、屈曲や波打ちの原因を明らかにし、滑らかで単純な陰影形状を得るための陰影付け方法を提案した。その他、見栄えを良くする形状処理技術に関して、種々の成果を得た。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to generate and control free-form surfaces by taking account of the appearance by lighting and reflections. We clarified the parameters of log-aesthetic surfaces with good reflected shapes, and proposed interactive control methods. Also, we proposed complete log-aesthetic surfaces as an ideal class of surfaces. On discrete shade shapes created by diffuse reflection and cel shading, we clarified the mechanism of bending and waving, and proposed new shading algorithms to obtain simple and smooth shapes. We also obtained various results on shape processing techniques that improve appearance.

研究分野：画像情報工学

キーワード：形状処理 コンピュータグラフィックス

## 1. 研究開始当初の背景

CG や意匠デザインにおいて曲面形状を作成する際、種々の視点や光環境下で見たときの見え方、すなわち(2次元的な)「見栄え」が極めて重要な評価要因となる。曲面の見栄えは、形状そのものに加えて表面での反射光に大きく左右される。反射光は、曲面形状、反射属性、周囲の光環境、視点位置のすべてに依存するため、見栄えの良い形状の作成には、諸条件での画像生成・評価を伴う膨大な試行錯誤が必要となる。たとえば、車など光沢をもつ曲面形状の意匠デザインでは、鏡面反射による映り込み形状の変形や動きが重要であり、曲面を修正するたびに映り込みの評価を多視点から行う必要がある。また、アニメ表現を3次元CGで実現する際には、物理的な反射モデルに閾値処理を加えた陰影づけ手法(toon shading)だけでは適切な陰影形状が得られず、曲面形状生成の試行錯誤に加えて、後処理として人手で画像を補正するなどの手間がかかる。

表面反射や照明に依存する2次元の見栄えの直接操作という観点では、逆問題を解くことによって見栄えを制御しようとする研究が、これまでも種々の設定のもとで行われている。しかし、個々の状況に限定すれば対話的操作で良い結果が得られるが、様々な視点から見たときに共通する問題を包括的かつ効率的に解決するものではない。

## 2. 研究の目的

本研究では、曲面形状特徴と、鏡面・拡散反射による見栄えとの間の関係を、理論的に解析・類型化し、見栄えを包括的に考慮した曲面形状生成・制御の方法論を構築することを目指す。従来手法での、まず3次元形状を作成し、視点・照明・反射属性を変化させながら2次元の見栄えを確認するという常識を覆し、2次元の見栄えの包括的な制約に基づいて3次元形状を作成するという新しいパラダイムを構築する。本研究によって、曲面形状モデリングの飛躍的な効率化と、CG や意匠デザインの品質向上が期待できる。

本研究では、4年間の研究期間内に、次の事項の解明・構築する。

曲面形状特徴と、鏡面反射で映り込む像の変形や動きとの関係の解明

曲面形状特徴と、拡散反射や影による濃淡形状特徴との関係の解明

意匠デザインのための、見栄え主導型曲面形状生成の方法論の構築

非写実的CGのための、見栄え主導型曲面形状生成・非写実的描画の方法論の構築

## 3. 研究の方法

本研究では、研究代表者・分担者のそれぞれの研究室の大学院生を研究分担者として

加え、以下の体制で実施した。

斎藤隆文研究室(東京農工大学)

- ・研究の統括理論・
- ・理論の創生
- ・方法論の構築

吉田典正研究室(日本大学)

- ・解析環境の構築
- ・方法論の実装

原田利宣研究室(和歌山大学)

- ・デザインの立場からの解析・評価

今関俊博研究室(首都大学東京)

- ・アニメ制作の立場からの解析・評価

研究の進め方として、反射による見栄えの定性的観察、意匠デザインおよびアニメにおける当該問題の解析、曲面形状特徴と鏡面・拡散反射による見栄えとの間の関係の解析と定式化・類型化の順に進め、それをもとに、見栄えを包括的に考慮した曲面形状生成・制御の方法論を構築し、意匠デザイン、アニメ制作の立場から評価することとした。また、形状と見栄えに関する様々な関連研究を、並行して進めることとした。

## 4. 研究成果

本研究の成果について、鏡面反射形状の解明と意匠デザイン応用、拡散反射形状の解明と非写実的CG応用、表面微細形状による反射特性制御、美的曲線形状処理、形状と見栄えに関連したその他の成果、に分けて述べる。最後に、これらの成果の位置づけと今後の課題をまとめる。

### (1) 鏡面反射形状の解明と意匠デザイン応用

曲面に生じる鏡面反射形状は、曲面の曲率変化が大きく関係しており、曲率変化が単調でない場合に鏡面反射にうねりが出やすいことが知られている。そこで、曲率単調性を持つ対数美的曲線に基づいた、対数美的曲面を中心に、鏡面反射形状を解析した。

対数美的曲面の生成・制御と反射形状解析  
対数美的曲線の各種パラメータを変えながらスイープして作る対数美的曲面について、鏡面・拡散反射による見栄えを精密にシミュレーションするシステムを開発した。映り込み曲線形状とパラメータとの関係を分析し、映り込み形状に不具合を生じる曲面の形成要因を解明した。また、拡張現実感を用いた様々な光源環境下での再現法や、ジェスチャ操作による対話的制御法を提案した。

### 完全対数美的曲面の生成と解析

2方向の等パラメータ線がすべて対数美的曲線であるような、完全対数美的曲面を提案した。その生成法と基本的性質を明らかにするとともに、鏡面反射に大きく影響する曲率変化の特性を解析した。

### (2) 拡散反射形状の解明と非写実的CG応用

3次元CGでセルシェーディングを用いることで、段階的陰影をもつアニメ風描画が得られる。このときの陰影形状の解析と制御に関して、いくつかの成果を得た。

#### 複数光源での影形状

曲面形状に複数の点光源による照明を行ったときの、等輝度線(すなわちセルシェーディングにおける陰影境界線)の形状のふるまいを解析した。その結果、複数光源でセルシェーディングを適用した場合に、影形状に屈曲点が生じることを見出し、その解決法を提案した。

#### 対数美的空間曲線に関する理論体系

複雑な3Dモデルにセルシェーディングを用いた場合、モデルの細かい凹凸により陰影境界線が複雑に曲がってしまう。アニメに適した単純な陰影形状を得るための一手法として、シェーディングの際の法線方向を、簡略化した3Dモデルの法線で置き換える方法、ならびに、法線方向を平滑化する方法を提案した。これにより、物体形状を保持したままに陰影形状を簡略化することが可能となった。

#### (3) 表面微細形状による反射特性制御

物体平面上に微細な凹凸形状を生成することで、その反射特性を制御し、視点あるいは光源方向に依存して異なる模様が現れるようなレリーフ形状を提案した。複数の微細凹凸パターンに対して、切削加工あるいは3Dプリンタを用いて試作した。2値画像の表現に対してはおおむね良好な結果を得たが、濃淡画像を表現するには、コントラストの改善が必要であることがわかった。

#### (4) 美的な曲線形状処理

良好な見栄えを得るための美的な曲線に関する研究として、対数美的曲線の生成と制御(複合リズム空間曲線の生成、不完全ガンマ関数を用いた曲線表現、縮閉線、G1エルミート補間、G2遷移曲線の生成、Bezier曲線による近似など)、3次曲線の美的解析(有理曲線全体集合の解明、多項式曲線の曲率変化の包括的解析)、形成外科手術への応用(耳介形状、外鼻形状、前頭部形状の曲線解析とテンプレート化)などの成果を得た。

#### (5) 形状と見栄えに関連したその他の成果

見栄えを良くするための形状処理に関する研究として、可視化(植物生長量、流体)、デザイン支援(ピクトグラム、製品レコメン、知識発見)、アニメ制作支援(動きの誇張表現)などの分野で種々の成果を得た。

#### (6) まとめ

上記の研究成果は、鏡面・拡散反射に起因する「見栄え」に着目して、意匠デザインや非写実的CGで実用的に使えるような曲面を組織的に生成・制御するための新しい理論体

系およびその実現技術を提案するものである。今後は、これらの技術が様々な場面で実用に供すること目標に、研究を継続する予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計20件)

平野 亮, 原田利宣,

映り込み曲線の分析に基づく不具合映り込み曲面の形成要因の解明,

デザイン学研究, Vol.61, No.4 pp.85-94 (2015) 査読有.

渡邊隆介, 竹内 舞, 原田利宣, 山田 朗, 形成外科手術におけるQOL向上を目指した日本人女性の前頭部における曲線質分析とテンプレート化,

日本感性工学会論文誌, Vol.14, No.1, pp.197-206 (2015) 査読有.

斎藤隆文,

ノンフォトリアリスティック・レンダリング,

日本印刷学会誌, Vol.51, No.4, pp.262-267 (2014) 査読無.

Takafumi Saito, Midori Yamada,

Norimasa Yoshida,

Shape Analysis of Cubic Bezier Curves

- Correspondence to Four Primitive Cubics,

Computer-Aided Design and Applications,

Vol.11, Is.5, pp.568-578 (2014) 査読有.

DOI: 10.1080/16864360.2006.10738484

原田利宣, 佐藤 瑛, 山田 朗,

形成外科手術への適用を考慮した日本人の外鼻形状における曲線の性質分析とテンプレート化

日本感性工学会論文誌, Vol.12, No.4,

pp.471-480 (2013) 査読有.

今間俊博, 斎藤隆文, 阿部翔悟,

アニメーションにおける動きの種類分析と誇張表現の適応手法,

日本図学会 図学研究, Vol.47, No.2-3,

pp.13-23 (2013) 査読有.

Norimasa Yoshida, Ryo Fukuda, Toshio Saito,

Takafumi Saito,

Quasi-Log-Aesthetic Curves in Polynomial Bezier Form,

Computer-Aided Design and Applications,

Vol.10, No.6, pp.983-993 (2013) 査読有.

DOI: 10.3722/cadaps.2013.983-993

D. S. Meek, T. Saito, D. J. Walton,

N. Yoshida,

Planar two-point G1 Hermite interpolating log-aesthetic spirals,

Journal of Computational and Applied Mathematics,

Vol.237, Is.17, pp.4485-4493 (2012) 査読有.

DOI: 10.1016/j.cam.2012.04.021

平野亮, 原田利宣, 床井浩平,  
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,  
情報処理学会論文誌, Vol.53, No.8,  
pp.2028-2035 (2012) 査読有.  
Norimasa Yoshida, Takafumi Saito,  
The Evolutes of Log-Aesthetic Planar Curves and the Drawable Boundaries of the Curve Segments,  
Computer-Aided Design and Applications,  
Vol.9, No.5, pp.721-731 (2012) 査読有.  
DOI: 10.3722/cadaps.2012.721-731  
R. Ziatdinov, N. Yoshida, T. Kim,  
Fitting G2 multispiral transition curve joining two straight lines,  
Computer-Aided Design, Vol.44, Is.6,  
pp.591-596, (2012) 査読有.  
DOI: 10.1016/j.cad.2012.01.007  
今間俊博, 齋藤隆文,  
トゥーンシェーディングにおける光源と陰影・影の状態設定手法,  
日本図学会 図学研究, Vol.46, No.2,  
pp.3-11 (2012) 査読有.  
H. N. Miyamura, M. Kureta, M. Segawa, J. Kubo, T. Saito, Y. Suzuki, H. Takemiya,  
Visualization of Blurred Images of Liquid by Multi-scale Analysis,  
Visualization of Mechanical Processes,  
Vol.1, Is.3 (2012) 査読有.  
DOI: 10.1615/VisMechProc.v1.i3.90  
大木基至, 原田利宣, 乾口雅弘,  
ラフ集合の決定ルール可視化による知識発見支援システム,  
知能と情報  
(日本知能情報ファジィ学会誌),  
Vol.24, No. 2, pp.660-670 (2012) 査読有.  
井上拓子, 原田利宣,  
ファジィ AHP を用いた製品レコメンドシステムの開発,  
日本感性工学会論文誌, Vol.11, No.2,  
pp.255-263 (2012) 査読有.  
山田 朗, 上田晃一, 原田利宣,  
小耳症における全耳介再建術の工夫,  
PEPARS, Vol.63, pp.77-94 (2012) 査読有.  
R. Ziatdinov, N. Yoshida, T. Kim,  
The analytic parametric equations of log-aesthetic curves in terms of incomplete gamma functions,  
Computer Aided Geometric Design,  
Vol.29, Is.2, pp.129-140 (2012) 査読有.  
DOI: 10.1016/j.cagd.2011.11.003  
楠岡真理子, 七夕高也, 古谷雅理,  
齋藤隆文,  
時空間投影画像を用いた植物生長量の抽出,  
画像電子学会誌, Vol.40, No.5, pp.808-814  
(2011) 査読有.  
大野森太郎, 原田利宣, 宗森 純,  
"動詞"の情報量分析に基づくピクトグラムデザイン支援システム,

デザイン学研究, Vol.58, No.2, pp.55-64  
(2011) 査読有.

- ⑳ Norimasa Yoshida, Ryo Fukuda, Toshio Saito, Takafumi Saito,  
Compound-rhythm Log-aesthetic Space Curve Segments,  
Computer-Aided Design and Applications,  
Vol.8, No.2, pp.315-324 (2011) 査読有.  
DOI: 10.3722/cadaps.2011.315-324

〔学会発表〕(計91件)

関口 湊, 齋藤隆文,  
完全対数美的曲面の生成と評価,  
情報処理学会 第77回全国大会, 2Y-05,  
京都大学(京都・京都)(2015/03/17-19).  
池田聡一郎, 原田利宣,  
ジェスチャ操作による対数美的曲面創成システムの開発,  
情報処理学会 第158回グラフィクスとCAD研究会, 理化学研究所(埼玉・和光)  
(2015/02/27).  
Eri Sato, Takafumi Saito,  
Modeling and Manufacturing Relief Surfaces with Specific Reflection Features  
- Independent Reflection Control for Four Lighting Directions -,  
4th Int'l Workshop on Image Electronics and Visual Computing (IEVC 2014), 1C-2,  
Samui (Thailand) (2014/10/07-10).  
Misako Nishii, Takafumi Saito,  
Qualitative Investigation on Formative Design Process Using 3D CAD by Industrial Designers,  
16th Int'l Conference on Geometry and Graphics (ICGG 2014),  
Innsbruck (Austria) (2014/08/04-08).  
Takafumi Saito, Norimasa Yoshida,  
Classification of Rational Cubic Bézier Curves,  
8th Int'l Conference on Curves and Surfaces,  
Paris (France) (2014/06/12-18).  
Kenji Shikano, Takafumi Saito, Norimasa Yoshida,  
Complete Log-Aesthetic Surfaces by Logarithmic Helical Sweep,  
SIAM Conference on Geometric & Physical Modeling (GD/SPM 13),  
Denver (USA) (2013/11/11-14).  
Takafumi Saito, Midori Yamada, Norimasa Yoshida,  
Shape Analysis of Cubic Bezier Curves  
- Correspondence to Four Primitive Cubics,  
International CAD Conference 2013,  
Bergamo (Italy) (2013/06/17-20).  
Norimasa Yoshida, Ryo Fukuda, Toshio Saito, Takafumi Saito,  
Quasi-Log-Aesthetic Curves in Polynomial Bezier Form,  
International CAD Conference 2013,

Bergamo (Italy) (2013/06/17-20).  
Takuya Ozawa, Tatsuya Goibuchi, Takafumi Saito,  
View-Dependent Relief Surfaces,  
ACM SIGGRAPH Asia 2012, Poster,  
Singapore (Singapore) (2012/11/28-12/01).  
Takafumi Saito, Norimasa Yoshida,  
G1 Hermite interpolation with extended  
Tschirnhausen cubic spirals,  
8th Int'l Conf. on Mathematical Methods for  
Curves and Surfaces,  
Oslo (Norway) (2012/06/28-07/03).  
Norimasa Yoshida, Yuki Kobayashi,  
Takafumi Saito, Kenjiro Miura,  
G1 Hermite Interpolation of Bezier Unit  
Quaternion Integral Curves,  
8th Int'l Conf. on Mathematical Methods for  
Curves and Surfaces,  
Oslo (Norway) (2012/06/28-07/03).  
Norimasa Yoshida, Takafumi Saito,  
The Evolutes of Log-Aesthetic Planar Curves  
and the Drawable Boundaries of the Curve  
Segments,  
International CAD Conference 2012,  
Niagara Falls (Canada) (2012/06/11-14).  
Toshihiro Komma, Takafumi Saito, Yuuki  
Takano,  
Painted Color Texture for Cel Touch  
Animation Characters,  
2012 International Workshop on Advance  
Image Technology,  
Ho Chi Minh (Vietnam) (2012/01/10).  
Toshihiro Komma, Takafumi Saito,  
Cel touch animation shadow control by light  
sources,  
9th International Conference of Asia Digital  
Art and Design Association,  
北九州国際会議場 (福岡・北九州)  
(2011/12/10).  
Norimasa Yoshida, Takafumi Saito,  
Some characteristics of log-aesthetic planar  
curves,  
SIAM Conference on Geometric and  
Physical Modeling (GD/SPM11),  
Orlando (USA) (2011/10/24).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計1件)

名称：プログラム，記憶媒体，及び空間曲線  
生成装置

発明者：吉田典正，福田諒，斎藤隆文

権利者：日本大学，東京農工大学

種類：特許

番号：第5487416号

出願年月日：2009年6月8日

取得年月日：2014年3月7日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ

東京農工大学 斎藤研究室

<http://www.tuat.ac.jp/~vcl/>

日本大学 吉田研究室

<http://www.yoshida-lab.net/research-j/>

和歌山大学 原田研究室

<http://www.wakayama-u.ac.jp/~harada/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

斎藤 隆文 (SAITO, Takafumi)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60293007

(2) 研究分担者

吉田 典正 (YOSHIDA, Norimasa)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：70277846

原田 利宣 (HARADA, Toshinobu)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：80294304

今間 俊博 (KOMMA, Toshihiro)

首都大学東京・大学院システムデザイン

研究科・教授

研究者番号：40327143

(3) 連携研究者

なし