意匠デザインにおける高品質形状のための曲率単調曲線生成手法*

木村文彦** 大家哲朗*** 青山英樹***

Generating Method of Monotonic-Curvature Variation Curve for High-Quality Shape in Aesthetic Design

Fumihiko KIMURA, Tetsuo OYA and Hideki AOYAMA

In this study, a theoretical investigation on the Class A condition for planar curves is conducted. Here, the term "Class A" denotes high-quality curves and surfaces that have mainly been used for industrial products like automobiles. Although high-quality shapes play an important role in aesthetic design, its effective generating method have not been developed. Fundamental study on Class A curves have progressed recently; however, its condition is not sufficient and how to control this curve has not been presented sufficiently. Therefore, our method presented in this paper proposes an additional condition for creating Class A Bézier curve to produce high-quality shapes and also proposes a curve generating method and system to prove the usefulness of this method.

Key words: style-design, Class A, aesthetic shape

1. 序 論

近年、製品設計においてデジタル技術、特に 3DCAD が一般化したことにより、製品形状設計の多くの工程はデジタルツールを用いて行われる。しかし、CAD システムで一般的に用いられているパラメトリック曲線・曲面は制御点によって形状を生成するため直感的な操作が行いにくく、デザイナーのアイデアを反映させることが求められる意匠デザインプロセスにおいては必ずしも効率的ではない。そのため、曲線・曲面における意匠的な観点での価値や意味を定義して形状表現に活用することへの関心が高まっており、関連研究が増えている。

原田らは自然物や工芸品の持つ美的要素として、対象形状を構成する曲線の曲率の変化に注目し、その特徴が曲率対数分布図の傾きで表すことができることを明らかにした¹⁾。更に、この特徴とデザイナーが扱う視覚言語との関連性を調査し、美的曲線の分類を行った。また、三浦はこの美的曲線の一般式を導出した²⁾。しかし、この式は積分式で示されているため、そのままでは CAD システムなどで扱うことが出来なかった。そこで、吉田らによる Bézier 曲線での近似などパラメトリック曲線による近似手法が検討された³⁾。また、三浦ら⁴⁾は対数型美的曲線のより高度な応用のために、三連の対数型美的曲線の G^2 エルミート内挿による接続法を提案している。

自動車デザイン等で要求される高品質曲面を生成するための初期の研究として、Higashi らによる意匠形状に求められる自由曲面を生成する CAD システムに関する研究⁵⁾がある。その後、Mineur らは点群のフィッティング手法の検討において曲率の連続性に着目し、曲率が連続かつ単調である曲線の生成法として Bézier 曲線を用いた典型的曲線 (typical curve) の提案を行った⁶⁾。しかし、この手法では各軸方向に一樣なスケールと回転行列を用いて曲線の生成を行うため、扱える曲線に限りがあった。そこで Farin はこの典型的曲線を基礎とし、より一般的な曲率単調曲線を生成するために、特異値を用いた条件を定めた。そこでは、自動車業界で慣用的に用いられる用語で

ある "Class A" を用いて曲率単調曲線を Class A 曲線と呼称し、Class A Bézier 曲線の生成を行うための提案を行った⁷⁾。この手法では、典型的曲線よりも自由度の高い曲率単調曲線の生成が行える。しかし、曲線生成時に用いる制御点生成行列の決定方法が示されていないため、実際に生成を行わないと曲線の形状が分からず、直感的曲線生成には向かない。また、条件によっては曲線の終端点の位置が、実際に曲線生成をしてみるまでわからないという問題もある。また、Yoshida らは 3 点を指定した典型的 Class A Bézier 曲線の対話的生成法と生成された曲線の性質について検討を行っている⁸⁾。福田らは 3 次元 Class A Bézier 曲線について、端点と接線ベクトルを指定した対話的な Class A Bézier 曲線生成手法の提案を行っている⁹⁾。

以上のように意匠的な意味を持つ曲線の研究は行われているが、CAD システム化されるほどの一般性や実用性を獲得するには至っていない。これはこのような曲線に対してその性質を検討する研究はなされているが、その生成手法や利用法についてはあまり研究がなされていないためであると考えられる。特に上述の Class A 曲線はその数学的見通しの良さと、効率的に曲率変化曲線を生成できるという利点があるにも関わらず、その活用手法は確立していない。

そこで本論文では、2D Class A Bézier 曲線を活用して高品質形状を生成するシステムの構築を目的とした基礎的検討を行う。具体的には、新たな 2D Class A 曲線の定義および生成手法として、特異値分解を用いた制御点生成行列の定式化を行う。また、効率的な活用方法の一提案として、曲線の両端点を指定できる 2D Class A 曲線生成手法を定め、パラメータのランダム生成を用いた 2D Class A 曲線生成アルゴリズムの提案を行う。最後に、これらを実装したデザインシステムを用いてサンプルモデルを作成することでその実用性の検討を行う。

2. 曲率単調曲線生成の基礎理論

本章では本研究で用いている Class A Bézier 曲線について、Mineur による典型的曲線と Farin による Class A Bézier 曲線、及び本研究で提案している Class A Bézier 曲線の特異値分解表現のそれぞれの基礎理論について述べる。以下では、曲線の曲

* 原稿受付 平成 25 年 10 月 10 日

** 学生会員 慶應義塾大学大学院 (神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

*** 正会員 慶應義塾大学 (神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

率関数が単調減少・増加である曲線を曲率単調曲線と呼称する。

2.1 典型的曲線

典型的曲線は Mineur らによって定義された曲率単調曲線を生成する手法の1つである⁶⁾。この手法では Bézier 曲線を極座標を用いて

$$C(u) = \sum_{k=1}^m l_k e^{j\theta_k} f_{k,m}(u) \quad (1)$$

のように表し、Bernstein 基底関数を

$$f_{k,m}(u) = \sum_{i=k}^m (-1)^{i+k} \frac{m!}{i(k-1)!(i-k)!(m-k)!} u^i \quad (2)$$

と書き換える。このときそれぞれのベクトル間の角度差 $\phi = \theta_{i+1} - \theta_i$ 、及びベクトル間の倍率 $h = l_i/l_{i+1}$ が共に一定であるとする、この曲線の曲率関数 $\rho(u)$ は

$$\rho(u) = \frac{m-1}{m} \frac{h \sin \phi}{l_1} \frac{1}{a^{m+1}} \quad (3)$$

$$a = \sqrt{1 + 2(h \cos \phi - 1)u + (1 - 2h \cos \phi + h^2)u^2} \quad (4)$$

と表すことが出来る。曲率関数が単調であるために満たすべき条件は

$$\frac{d\rho(u)}{du} \neq 0 \quad \text{for } u \in [0, 1] \quad (5)$$

である。次式が曲線が曲率単調曲線であるための条件である。

$$h > \frac{1}{\cos \phi} \quad \text{or} \quad h < \cos \phi \quad (\cos \phi > 0). \quad (6)$$

2.2 Class A Bézier 曲線

Farin⁷⁾は Mineur らによる典型的曲線の一般化として Class A Bézier 曲線の定式化を行った。n 次の Bézier 曲線を

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{b}_i B_i^n(t) \quad (7)$$

と表現する。ここで $\mathbf{b}_i$ は制御点であり、 B_i^n は Bernstein 多項式である。この式をパラメータ t に関して 1 階微分すると次式のようにになる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = n \sum_{i=0}^{n-1} \Delta \mathbf{b}_i B_i^{n-1}(t). \quad (8)$$

ここで $\Delta \mathbf{b}_i = \mathbf{b}_{i+1} - \mathbf{b}_i$ であり、これは次のようにも表せる。

$$\Delta \mathbf{b}_i = \mathbf{v}_i = \mathbf{M}^i \mathbf{v}; \quad i = 0, \dots, n-1. \quad (9)$$

行列 $\mathbf{M}$ は曲線の次元に応じた成分数の行列であり、 $\mathbf{v}$ は任意の単位ベクトルである。このとき、曲線が曲率単調となるためにこの行列 $\mathbf{M}$ に課される条件は以下の二つである。

1. ベクトル $\mathbf{M}\mathbf{v}$ とベクトル $\mathbf{v}$ の内分ベクトルである $\mathbf{T}\mathbf{v}$ が常に $\mathbf{v}$ より大きい ($\mathbf{T}$ は内分比を持つ線形変換行列)。

2. 行列 $\mathbf{M}$ の特異値を σ_i としたときに、最小特異値の自乗が最大特異値より大きい。

これを満たす条件の数式表現は以下のように定められる。

$$\begin{cases} \mathbf{v} \cdot \mathbf{M}\mathbf{v} \geq \|\mathbf{v}\|^2 \\ \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 1 \text{ and } \sigma_2^2 \geq \sigma_1 \end{cases} \quad (10)$$

ここで式 (10) は Farin による条件式を展開し、簡素化したものである。これらの条件を満たす行列 $\mathbf{M}$ を用いて生成された制御点をもつ Bézier 曲線を Class A Bézier 曲線と呼び、そのときの $\mathbf{M}$ を Class A 行列 $\mathbf{M}_{\text{ClassA}}$ とする。この手法ではベクトル

の変換に任意行列 $\mathbf{M}$ を用いることが出来るので、拡大と回転のみを扱っている典型的曲線よりも多様な曲線が生成出来る。

2.3 Class A 行列の特異値分解表現

Farin の手法においては一定の条件を満たした行列による一次変換で制御点を構成するベクトルを生成することで Class A Bézier 曲線が生成出来ることが示されたが、この行列を決定する手法に関しては述べられていなかった。そこで本研究ではこの行列を特異値分解した形で定義を行う¹⁰⁾。

特異値分解とは任意の長方形行列 $\mathbf{C}$ に対する、

$$\mathbf{C} = \mathbf{Q}\mathbf{\Sigma}\mathbf{R}^T \quad (12)$$

のような分解のことである。この分解は固有値分解とは異なり、行列 $\mathbf{C}$ の行数、列数に関係なく分解を行え、また $\mathbf{\Sigma}$ の対角成分である特異値は $\mathbf{C}^T \mathbf{C}$ の固有値の平方根として得られるため、常に正の値として取り出せるという特徴を持つ。Class A Bézier 曲線に用いられる行列 $\mathbf{M}$ を特異値分解すると、行列 $\mathbf{M}$ は

$$\mathbf{M} = \mathbf{U}(\alpha) \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{bmatrix} \mathbf{V}(\beta)^T \quad (13)$$

のように表せ、行列 $\mathbf{U}(\alpha)$ 、 $\mathbf{V}(\beta)$ は回転行列となる。また、特異値を持った対角行列はそれぞれ x 軸、 y 軸方向へのスケールングを表している。

Class A 行列は回転角 α, β と特異値 σ_1, σ_2 という4つのパラメータを Class A 条件を満たすように選択することで生成できるため、微積分式を解いたり²⁾、連立方程式を解く⁹⁾ 必要がなく、比較的容易、かつ高速に曲率単調曲線の生成が可能である。また、それぞれのパラメータが幾何学的な意味を持つため、曲線に及ぼす効果を把握することが容易である。

3. 提案手法

本章では上記のような Class A 行列の特異値分解表現を用いて曲線の生成やその性質の検討を行う。Farin による Class A Bézier 曲線では典型的曲線よりも曲線表現の自由度が高いため、特異値による条件を適用することで曲線の曲率単調性の確保を試みていた。しかし、Cao らによる指摘にもあるように Farin によって示された条件には不完全な部分が存在し、少なからず曲率単調でない曲線が生成されてしまっていた¹¹⁾。本章では Class A Bézier 曲線について、より確実性の高い生成条件を検討すると共に、曲率変化を考慮した曲線形状の制御手法も検討する。

3.1 Class A 条件の再検討

本研究での Class A 行列 $\mathbf{M}_{\text{ClassA}}$ の決定においては $\mathbf{M}_{\text{ClassA}}$ の特異値が用いられている (式 (13))。この Class A 行列によるベクトルの一次変換では回転行列による回転と特異値行列によるスケールングが行われるが、この特異値行列によるスケールングの際、各軸方向に異なった倍率のスケールングが行われることによって単純な回転拡大行列によるものとは違い、生成されるベクトルによってその倍率と角度はそれぞれ異なる (図 1)。この倍率の違いや回転角の大きさは入力ベクトルによって異なるため、制御ベクトルの変換過程においてそれぞれのベクトル間で条件式 (10) の関係に差異が生じる。そのため初期ベクトルとその変換ベクトルの間で条件判定を行う条件式 (10) ではこの角度変化に対応出来ず、ベクトル対によっては Class A 条件を満たしていないことが考えられる。図 2 は条件式 (10) を満たしているにも関わらず曲率が単調減少となっていない例である。表 1 で示しているように $\mathbf{v}_0, \mathbf{v}_1$ 間では条件式 (10) が満たされているのに対して、 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 間では満たされていないことがわか

Fig. 1 Vector translation by Class A matrix

Fig. 2 Example in which the condition (10) is not satisfied

る。そこでこのような Class A 行列を用いた場合の Σ によるスケージングの性質から Class A 条件の適用の見直しを行い、すべてのベクトル対 $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i+1}$ ($i = 0, 1, \dots, n-1$) において条件式 (10) を適用することで Class A Bézier 曲線の曲率単調性の確保を試みた。これにより条件式 (10) は

$$\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_{i+1} \geq \|\mathbf{v}_i\|^2 \quad (14)$$

と書き直される。ここで $\mathbf{v}_i$ は式 (9) 中のものと同一である。

ここで、このように書き直された条件式によって生成される曲線の曲率単調性を、乱数を用いた曲線生成実験によって検証した。この条件式 (14) を用いて曲線生成実験を行った場合、条件式 (10) の場合と比べて曲率単調である曲線が生成される確率は 0.2% 上昇し、99.8% となった。また、同様の条件式を 3 次元曲線の生成に適用したところ、こちらでも曲率単調である曲線が生成される確率は約 8% 上昇し、99.6% となった。このように、本手法を用いて曲線生成を行うことで従来手法の場合よりも非 Class A 曲線となる割合が減少し、より実用性が高まった。

3.2 曲率変化により曲面生成に生じる影響

Class A Bézier 曲線の生成では曲率単調性を満たした曲線には図 3 のように上に凸の場合、下に凸の場合、変曲点を持つ場合の 3 パターンの曲率プロットが見られる。これらの曲線を用いて曲面生成を行うことを考える。本研究では曲線を用いた曲面生成の手法として直交する 2 つの Bézier 曲線の制御点を足し合わせ

て作成した制御点ネットワークから Bézier 曲面を生成する方法を用いている。これは例えば 2 つの Bézier 曲線の制御点をそれぞれ $\mathbf{B}(m)$ ($m = 0, 1, 2, 3$), $\mathbf{C}(n)$ ($n = 0, 1, 2, 3$) としたとき、Bézier 曲面の制御点 $\mathbf{D}(m, n)$ が $\mathbf{D}(m, n) = \mathbf{B}(m) + \mathbf{C}(n)$ と定める Bézier 曲面のことを指している。この方法で生成された曲面を考える場合、図 3 の (c) に見られるような曲率プロット中に変曲点を持つ曲線を用いると、曲面のガウス曲率分布に影響を与える。図 3 の (a) のような下に凸の曲率プロットを持った曲線から生成した図 4 の曲面では一様な曲率分布が見られるが、曲率プロットに変曲点を持つ曲線を用いて曲面生成を行った図 5 の場合、Bézier 曲面のパラメータ方向の断面曲線において曲率単調でない曲面が生成される。このような曲面のガウス曲率分布は特に鏡面反射の仕方に影響し、ガウス曲率が高い部分に反射した像が吸い込まれていくように歪んでしまう。本研究ではガウス曲率が単調に分布する曲面を望ましい曲面としてとらえている。そのため、変曲点のある曲面の生成は抑えられることが望ましい。本論文では曲面の滑らかさを表す尺度の一つとしてガウス曲率による曲面曲率分布を用いることでその性質の検討を行っている。

3.3 曲率プロットにおける変曲点の制御手法

曲率プロットにおいて変曲点のある曲面の発生を抑えたり、逆に意図的に発生させたりするためには、曲率に変曲点を持つ曲線の発生原因を調査し、その生成を制御する必要がある。そこでこのような曲線が生成される場合と Class A 行列のスケージング特性の関係から曲率プロット中の変曲点発生の原因について検討を行った。

曲率プロット中の変曲点が生じる場合、曲率の 2 階微分が 0 になる点が存在することになる。これを抑制するには

$$\frac{d^2 \rho}{du^2} > 0 \quad (15)$$

となるための条件が必要である。式 (3) からこれを求めると

$$m+2 > \frac{h^2 \sin^2 \phi}{(1-h \cos \phi)^2} \quad (16)$$

$$m+2 < \frac{\sin^2 \phi}{(h - \cos \phi)^2} \quad (17)$$

という二つの条件式が求まる。これらの式を用いることで特異値が一定である Class A 曲線（典型的曲線）において、曲率プロット中の変曲点の発生を制御することが可能である。

次に特異値が一定でない場合について、曲率プロット中に変曲点を持つ曲線の特徴を調べたところ、Class A 行列のスケージング特性から生成した各制御ベクトル間の回転角には一定・増加・減少・振動の 4 パターンの変化が現れることが分かった。このうち変曲点を持った曲率プロットの曲線を生じるのは生成した制御ベクトル間の回転角に大きく増加している部分を持つものであった。特に高次の Bézier 曲線において回転角の変化が大きくなる点が複数存在するとき、2 つ以上の変曲点を持った曲率プロットの曲線が生成される場合が存在した (図 6)。ここで回転角が大きく変化した原因には特異値によるスケージングの入力ベクトルへの依存性が考えられる。特異値によるスケージングでは入力ベクトルが軸方向ごとに異なる倍率でスケージングされるため、入力ベクトルの存在する象限によって拡大される方向が変化する。そのため制御点ベクトルの生成の際、入力ベクトルの存在象限が複数象限にまたがる場合、スケージングの方向が 180° 逆転してしまうことで回転角の変化が大きくなってしまふと考えられる (図 7)。そこで、制御点ベクトル生

Table 1 Relationship between the vectors that are used in Fig.2

	$i = 0$	$i = 1$
$\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_{i+1}$	121	203
$\ \mathbf{v}_i\ ^2$	119	565

Fig. 3 Typical curvature patterns of Class A Bézier curves

Fig. 4 Surface with uniform curvature variation

成時に入力ベクトルが一つの象限内に収まるよう条件を追加する。この条件は初期ベクトルが x 軸正方向の基底ベクトルとすると生成する曲線の次数が n のとき、 $n-1$ 個目の制御点ベクトルの初期ベクトルとのなす角 ω_{n-1} と Class A 行列による 1 つ目の回転角 α を用いて

$$0^\circ < \omega_{n-1} + \alpha < 90^\circ \quad (18)$$

と表される。このような条件式を用いることで曲率プロット中の変曲点の発生を回避することが可能である。

4. 曲率単調曲線生成システム

Class A Bézier 曲線は生成が容易で、生成曲線がパラメトリック曲線として表現されるため、実用性においても有用であるが、

Fig. 5 Surface with non-uniform curvature variation

Fig. 6 Example of a curve that has two inflection point in its curvature variation

Fig. 7 Two translation types of a vector v by M

Farin の手法においては生成される曲線の両端点の指定が出来ないという問題と、生成してみないとどのような曲線になるかわからないという問題があった。以下ではこれらの問題を考慮した曲線生成手法について述べる。

4.1 両端点一致法

Bézier 曲線がアフィン不変であることを利用して、回転とスケーリングを用いて両端点をユーザが指定した点と一致させるようにする。この手法では任意の初期ベクトルと Class A 行列を用いて生成した Class A Bézier 曲線に対して、

1. 生成した曲線の両端点を結んだ直線をつないだ直線と指定した両端点となる点を結んだ直線が一致するように回転、
2. 終端点が指定した終点に一致するようにスケーリング、

の 2 つの操作をもって指定した両端点と一致した曲線の生成を行う (図 8)。この際、始端点は原点であると仮定しているが、これが原点でない場合は上記の操作の前後に変換座標系を原点に合わせる操作と元に戻す操作が必要である。

4.2 生成アルゴリズム

Class A Bézier 曲線の生成理論、及び両端点一致法を用いて Class A Bézier 曲線生成アルゴリズムの作成を行った。このアルゴリズムではユーザによる両端点の指定とプログラム内部で生成された Class A 行列を基に曲線の生成を行う。本研究では、特異値パラメータ等の数学的枠組をユーザが意識することなく曲線生成を行えるようにするために、パラメータのランダム生成と Class A 判定を組み合わせた曲線生成システムを構築した。本論文では回転角パラメータ、及び特異値パラメータをシステムがランダムに生成することで曲線の生成を行っている。

まずユーザは作成したい曲線が結ぶ両端点を指定する。そしてプログラムがランダム生成した回転角、及び特異値パラメータを用いて Class A 条件から作成した Class A 行列によって任意の曲線を生成し、この曲線をユーザが指定した両端点に一致するように回転とスケーリングが行われてユーザに提示される。

Fig. 8 Schematic illustration of the geometric translation for end-points fitting

ユーザは自分の望む形状の曲線が提示されるまで曲線生成を繰り返し、ユーザの意図に最も近い曲線形状を取得する。これを図で示した物が図9である。このようなアルゴリズムを用いて作成した Class A 曲線の生成システムを図10に示す。図10において上部に表示されている曲線が Class A 曲線であり、下部に表示されている曲線は曲率を縦軸に Bézier 曲線のパラメータ t を横軸に取った曲率のを示すものである。またシステムでは随時 Bézier 曲線の次数を変更出来る。このシステムによって生成された曲線の曲率は全て単調減少であった。このアルゴリズムでの曲線生成では、一つの曲線を生成するのに要した時間は、Intel Core i7 (2.8GHz×4)、メインメモリ 16GB のコンピュータで 0.3ms 程度であった。

5. 実行結果

本章では、我々が構築した曲線生成システムを用いた形状設計事例を提示し、有用性の検証を行う。作成した曲面モデルは図11に示しているものである。比較検討のために図11(a)のような本手法を用いて生成した2つの5次 Class A Bézier 曲線をスイープさせて作成した曲面と図11(b)のような本手法を用いずに手作業で制御点を決定した2つの曲線を用いて作成した曲面を用意し、これらに対して曲面解析を行った。以下の図中における(a)、(b)はこれと同様の方法によって作成されたモデルを示している。モデルの作成、及び曲面の解析には AppliCraft 社の Rhinoceros を使用した。

曲面解析に使用した手法はガウス曲率分布図とゼブラマッピングの二つである。ガウス曲率分布によって提案手法を用いたモデルと用いていないモデルは図12のように表される。この図において、両モデルの曲率は同じような変化を示しており、ほぼ単調な変化をしている。しかし、本手法を用いていないモデルの上部付近において若干ガウス曲率の分布が単調でない部分が見られる。ゼブラマッピングによる表示では、2つの曲面モデルは図13のように表される。図13において、提案手法を用いたモデルでは縞模様が境界線に沿う形で表示され、また境界線に近づくにつれて縞が細くなっている。これは使用した曲線の曲率変化パターンがそのまま曲面に反映できていることを示している。一方、提案手法を用いていないモデルでは上部及び下部の境界線付近で縞模様が大きく丸まっている。これはこの

Fig. 9 Flow chart of the proposed system for Class A curve generation

付近で予期していない曲率の変化が生じ、高品質形状が達成できていないことを示している。提案手法によって生成された曲面を用いたマウスのレンダリング図を図14に示す。

今回のように曲線をスイープさせて曲面を作成する場合、作成された曲面の曲率の変化の仕方は使用した曲線の影響を受けるが、どのように影響するかは曲面を作成しなければわからない。そのため、曲線の影響を抑えるために曲率単調曲線を用いて曲面を作ることは曲面の品質を一定に保つ上で有用であると考えられる。提案システムを用いると、生成される曲線の曲率単調性はシステム上、常に保証される。そのためデザイナーは曲率単調性を意識することなく、望む形状を得ることのみに集中することが出来る。

6. 結 論

本研究では、曲率単調曲線を用いた高品質形状生成システムの開発のための基礎研究として、Class A Bézier 曲線の生成条件に関する検討を行い、それを活用した曲率単調曲線生成システムの構築と検証を行った。まず、Class A Bézier 曲線の生成条件に関して、Class A 行列の性質についての検討をさらに進めることでより確実に曲率単調曲線を生成することが可能となった。また、提案手法によって生成された曲率単調曲線を用いることの有用性を、曲面生成への適用事例を通して、システムの支援なしで生成した場合と比較することで示した。今後の課題としては、今回検討した Class A Bézier 曲線の生成条件の空間 Class A Bézier 曲線への適用、Class A 行列における各パラメータと原田らの視覚言語¹⁾への関連づけ、Class A 曲面生成手法の確立などが挙げられる。

参 考 文 献

- 1) 原田利宣, 森典彦, 杉山和雄: 曲線の性質に関する定量化研究, 日本デザイン学会, 40, 6 (1994), 9.
- 2) 三浦憲二郎: 美しい曲線の一般式とその自己アフィン性, 精密工学会誌, 72, 7 (2006), 857.

Fig. 10 Example of Class A curves generating system

- 3) 吉田典正, 斎藤隆文: 美的曲線の有理 3 次 Bézier 近似, 情報処理学会, **125**, (2006), 25.
- 4) 三浦憲二郎, 澁谷大, 白杵深, 蘭豊礼, 玉井博文, 牧野洋: 対数型美的曲線を用いた G^2 Hermite 内挿法, 精密工学会誌, **79**, 3, (2013) 270.
- 5) M. Higashi, I. Kohzen and J. Nagasaka: An interactive CAD system for construction of shapes with high-quality surface, IFIP'83, North-Holland, (1983) 371.
- 6) Y. Mineur, T. Lichaha, J. M. Castelaina and H. Giaumeb: A shape controlled fitting method for Bézier curves, Computer Aided Geometric Design, **15**, 9, (1998), 879.
- 7) G Farin: Class A Bézier curves, Computer Aided Geometric Design, **23**, 7, (2006), 573.
- 8) N. Yoshida, T. Hiraiwa, T. Saito: Interactive Control of Planar Class A Bézier Curves using Logarithmic Curvature Graphs, Computer-Aided Design & Applications, **5**, 1-4, (2008), 121.
- 9) 福田諒, 吉田典正, 斎藤隆文: Class A Bézier 空間曲線の対話的生成と典型的空間曲線の性質, 精密工学会誌, **76**, 5, (2010), 587.
- 10) T. Oya, F. Kimura and H. Aoyama: Style design system based on Class A Bézier curves for high-quality aesthetic shapes, Proc. of the ASME IDETC/CIE 2012, **2**, A, (2012) 627.
- 11) J. Cao and G. Wang: A note on Class A Bézier curves, Computer Aided Geometric Design, **25**, 7, (2008), 523.

Fig. 11 Computer mouse models used for curvature analysis

Fig. 12 Curvature analysis with Gaussian curvature distribution

Fig. 13 Curvature analysis with zebra pattern

Fig. 14 The created computer mouse model