S-System による B-spline 曲線の自動生成

齊藤 光俊^{a,*} 芹川 聖一^b

Automatic Generation of B-spline Curve Using S-System

Mitsutoshi Saito^{a,*}, Seiichi Serikawa^b

(Received April 12, 2015; revised June 28, 2015; accepted July 21, 2015)

Abstract

The B-spline curve is often used as a method to draw an arbitrary curve like a handwritten figure. However, it is difficult to operate the position of the control points for the faithful drawing. In addition, to arrange the control points by hand, a lot of experiences are needed. In this study, the concept of S-System, which is one of the extended models of Genetic Programming, is utilized for the generation of the B-spline curve. The purpose in this study is to reproduce an arbitrary curve faithfully by using a less control points and to arrange the control points automatically. The detailed procedure is as follows. The several points on the curve are selected and it is regarded as the chromosome. The crossover is practiced between two chromosomes. For the validity of this strategy, B-spline curve similar to handwritten curve is reproduced by using a less control points, and they are arranged automatically.

キーワード：手書き図形, B-spline 曲線, 遺伝的アルゴリズム

Keywords : handwritten figures, B-spline curve, genetic algorithm

1. はじめに

コンピュータを用いて精巧な図面作成が可能になった昨今においても、思考段階におけるひらめきやアイデアは、紙媒体に手書きすることが多い。また、手書き図形は人に安心感、親近感を与え、それをコンピュータに取り込み使用したいというニーズも多く、独特な書体をしたフォントも流通している。しかしながら、携帯電話やモバイル機器で手書き図形や文字をフォントとして使用するためには、計算機資源を節約するために可能な限り制御点を削減し、データ量を圧縮することが要求される。手書き図形のような任意曲線を表現するための手法として、データ補完法の一つである B-spline 曲線がよく利用される。しかし、任意曲線を忠実に再現するためには、必要な制御点数の決定、制御点の位置の操作が煩雑であり、手作業で制御点数と配置位置の最適化を行うた

めには多くの経験を積み熟練しなければならない⁽¹⁾。制御点数を固定した場合には、制御点の位置を最適位置へ移動させる方法も提案されているが、あらかじめ基準の制御点を与えておく必要があり、初期値に大きく依存する場合がある⁽²⁻³⁾。また、コンプレックス法を用いて制御点の最適化を行う方法も提案されているが、コンプレックス法は予め制御点数を決め、その決められた制御点数の中で最適化が行われるため、制御点の数まで最適化できない⁽⁴⁾。

本論文では、上述の問題を解決し、人間が初期値を与えなくても、手書き曲線に一致するように B-spline 曲線の制御点数と配置位置を自動的に決定する方法を提案する。このために、固定長遺伝子を扱う遺伝的アルゴリズム (GA) に対して可変長遺伝子が扱え、有性・無性生殖の概念を導入することにより局所探索能力を向上させた S-System の概念を導入する。これにより、制御点数と配置位置の最適化を同時に行うことが可能になる。

本稿の構成は次のようになる。第 2 章では、S-System を基盤とした B-spline 曲線の自動生成アルゴリズムの生成手法を述べる。第 3 章では、単純な曲線と複雑な曲線における実験の結果を示す。最後に結論を述べる。

* Corresponding author. E-mail: m-saito@duck.niigataum.ac.jp

a 新潟経営大学

〒959-1321 新潟県加茂市希望ヶ丘 2909 番地 2

Niigata University of Management

2909-2, Kibogaoka Kamo, Niigata, Japan 959-1321

b 九州工業大学

〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

Kyushu Institute of Technology

1-1 Sensui-cho, Tobata, Kitakyushu, Fukuoka, Japan 804-8550

Fig.1. Relationship among curve, passing points and control points.

Fig.2. Definition of chromosome.

2. B-spline 曲線の生成手法

本研究では、B-spline 曲線の生成を最適化問題として捉え、進化論的手法の一つである S-System を適用する。進化論的手法であるため、最適化対象は遺伝子として定義する。これにより、手書き曲線とよく一致する B-spline 曲線を生成することが可能になる。

2.1 S-System の概要

近年、進化論的手法である遺伝的プログラミング (GP)⁽⁵⁾と実変数型遺伝的アルゴリズム (real GA) の手法を融合し、更に有性・無性生殖の概念を取り入れ、局所探索能力を向上させた「虫型人工生命による関数発見システム (S-System)」が提案され⁽⁶⁾、その改良システムも提案された⁽⁷⁾。S-System 全体のフローは GA, GP と同様である。まず、目的に合わせて遺伝子と適応度が設計される。一般的に適応度とは、個体の持つ遺伝子の優秀さを表す評価関数として定義される。個体とは与えられた問題における探索点を表現する。この個体には、探索点に関する情報 (遺伝子) の他に、探索時に有用となる情報 (微小移動量) が含まれる。全体のフローは以下のとおりである。

- (i) 初期処理としてランダムに多数の個体を生成する。
- (ii) 適応度の高い個体が確率的に多く選択される。
- (iii) 選択された 2 つの個体間で交叉と突然変異が行われる。その結果、新しい個体が誕生する。
- (iv) 目標とする適応度が得られるまで(ii)と(iii)を繰り返す。その結果、集団全体としては、世代が進むにつれて適応度が高くなる方向へ遺伝子に変化していく。

S-System では同種、異種概念を導入している。同種とは遺伝子構造の同じ個体のことであり、遺伝子構造の異なる個体を異種と呼ぶ。交叉は同種間のみで行われる。これを有性生殖と呼ぶ。有性生殖では、遺伝子構造が等しいため、交叉によって遺伝子構造は変化せず、遺伝子中に含まれる定数値のみが変化する。このため世代が進むにつれて定数値が最適化される。一方、同種が存在しない個体は、次世代に自分のコピーを 2 つ生成する。これを無性生殖と呼ぶ。無性生殖により、次世代には同種が 2 つ生成されることになり、有性生殖を行うことが可能になる。S-System では、遺伝子構造の変化は突然変異によって生じる。

2.2 遺伝子の設計

任意曲線は B-spline 曲線によって表現される。まず、任意曲線上の通過点 $[P_1, P_2, \dots]$ を抽出し、B-spline 逆変換⁽⁸⁾を用いて制御点 $[Q_1, Q_2, \dots]$ を獲得する。ただし、両端の制御点は多重頂点とし、 $Q_0=Q_1, Q_{\max}=Q_{\max-1}$ とする。その制御点に基づいて B-spline 曲線を描画する。つまり、通過点が決まればそれを逆変換することによって、制御点が求まり、B-spline 曲線を描画することができる。通過点と制御点の関係を図 1 に示す。ここで、任意曲線は画像上の x, y 座標を格納するベクトル型配列変数として保持する。

通過点から B-spline 曲線を得ることができるため、図 2 に示すように、通過点 P_i を遺伝子として定義する。実装においては、通過点 P_i をベクトル型配列変数として保持するのではなく、任意曲線が保持されているベクトル型配列変数における P_i の位置を示す配列インデックスを、スカラー型配列変数として保持する。また、各通過点には微小移動量 dP_i を設けている。これにより、遺伝子上の通過点に微小移動量を加算することにより、任意曲線上の通過点を微小移動させることができる。交叉は微小移動量に対してのみ行う。これは虫型 GA⁽⁹⁾と同じ手法である。遺伝子長と通過点の数は同じ長さである。S-System では遺伝子長は固定されていない。図 2 に示す遺伝子は遺伝子長が 4 であるが、異なる遺伝子長の遺伝子も存在する。各遺伝子の遺伝子長は、初期集団生成時にランダムに設定される。遺伝子長が変化するのは突然変異の時のみである。

2.3 交叉

S-System では、交叉に有性・無性生殖の概念を導入している。まず、同種と異種概念について説明する。図 3 に示すように、同じ遺伝子長の個体を同種、異なる遺伝子長の個体を異種と定義する。図 3 では、遺伝子 1 と遺伝子 2 は同じ長さであるため、遺伝子 1 と遺伝子 2 は同種である。遺伝子 3 の長さは他の個体と異なるため、遺伝子 3 は異種である。有性生殖は同種間で行われ、異種間では行われない。交叉の段階では、まずトーナメン

Fig.3. The difference between homogeneity and heterogeneity.

Fig.4. Crossover using bug type GA strategy.

ト戦略によって個体を選択する。次にその個体の配偶者として同種の個体を探索する。同種が存在する場合、最も高い適応度を持つ個体を配偶者として選ぶ。選択された個体とその配偶者は交叉によって2つの子孫を生成する。その際、図4に示すように、交叉の対象は通過点 P_i そのものではなく、通過点 P_i の微小移動量 dP_i である。これは虫型GAと同じ手法である。同種が存在しない個体を選択された場合、その個体は、自分の遺伝子のコピーを2つ子孫として生成する。これにより、通過点の位置の最適化が有効に働く。

2.4 突然変異

突然変異は、ある確率で遺伝子の通過点を追加、削除、更新する操作である。図5に例を示す。図5(a)は追加の例であり、通過点 P_5 を P_2 と P_3 の間に挿入する。図5(b)は削除の例であり、通過点 P_3 を削除する。追加と削除の操作により、通過点数が変化する。図5(c)は更新の例であり、通過点 P_2 を P_4 に更新している。これにより、通過点の位置を大幅に変更することができる。なお、追加、削除、変更の位置は乱数によりランダムに決定する。また、図4に示す通過点の微小移動量 dP_i もある確率で値を更新する。これにより、通過点数の最適化が有効に働き、局所解から抜け出しやすくなる。

2.5 適応度の計算

適応度とは、遺伝子の通過点を基に生成されたB-spline曲線が、どれほど手書き曲線に近づいたかを表す値である。生成されたB-spline曲線が手書き曲線と一致し、且つ通過点の数が少ないほど適応度が高くなるように設計した。速く正確に手書き曲線に近似させるために適応度マップを導入した。概要を図6に示す。図6(a)

Fig.5. Mutation of chromosome.

Fig.6. A handwritten curve and its degree map.

は手書き曲線、図6(b)は適応度マップを表す。図6(a)の画素数と図6(b)の画素数は同数である。適応度マップを構成する各画素の評価値を以下の式で表す。

$$evaluation = 255 - shift \times gain \quad (1)$$

$evaluation$ は画素の評価値、 $shift$ はその画素に最も近い手書き曲線座標までの距離、 $gain$ は定数である。(1)式を基に図6(a)の適応度マップを計算したものが図6(b)である。図6(b)を見るとわかるように、手書き曲線上の画素の評価値は255である。手書き曲線から1画素離れる毎に評価値は減少する。 $gain$ の値を増やすと、評価値は手書き曲線から離れるほど急速に減少する。この適応度マップを用いて適応度を計算する。その手順を以下に述べる。

- (i) B-spline 曲線を適応度マップ上に描画したと仮定し、B-spline 曲線に沿った画素の評価値の合計を計算する。
- (ii) 1画素あたりの評価値の平均値 fit_m を算出する。 fit_m はB-spline 曲線が手書き曲線と完全に一致する場合

Fig.7. The flowchart for generating B-spline curve.

255 となり，手書き曲線からずれるにつれて値が減少する。

- (iii) 一般に，通過点数が多いほど手書き曲線と B-spline 曲線は一致する。すなわち，通過点数の削減と，手書き曲線と B-spline 曲線の一致度はトレードオフの関係にある。そこで，通過点数の削減と，手書き曲線と B-spline 曲線の一致度を考慮した評価式を，MDL 基準⁽¹⁰⁾に基づき，適応度 fit を以下のように定義する。

$$fit = K_{fit} \cdot fit_m / 255 + (1 - K_{fit}) / number \quad (2)$$

ここで， $number$ は通過点数， K_{fit} は 1 以下の定数を示す。 fit は 0 以上 1 未満の値となる。第一項は手書き曲線と B-spline 曲線の一致度，第二項は通過点数の減少度を評価する。すなわち， fit_m が高く $number$ が少ないほど， fit は高い値となる。

2.6 B-spline 曲線の自動生成アルゴリズム

B-spline 曲線の生成のためのフローチャートを図 7 に

Fig.8. The flowchart for descendant generation routine.

示す。概要を以下に示す。

- (1) 入力には 256×256 画素のビットマップ形式の画像を用い，画像から手書き曲線を抽出する。ただし，画像から手書き曲線を抽出することが本研究の目的ではないため，手書き曲線に沿った全画素の座標は何らかの方法で取得される，またはデータとして与えられるものとする。なお，本研究では複雑な図形も複数の曲線の集まりと仮定する。例えば，手書きの四角形は 4 つの手書き曲線の集まりと考え，4 つの手書き曲線をそれぞれ B-Spline 曲線に自動変換することを本研究の目的とする。
- (2) 初期状態として，多数の個体を生成する。遺伝子長はランダムに設定し，通過点の位置は遺伝子長で等分割した位置とする。
- (3) 世代 g を 0 にセットする。
- (4) すべての個体エネルギー $Energy_p$ ($p=1,2,...,Pop$) を 0 とする。
- (5) すべての個体に対して以下の(6)～(8)の処理を実行する。
- (6) 移動によって遺伝子の通過点はわずかに変化する。すなわち，移動により， P_i は dP_i 隣の手書き曲線の画素に置き換えられる。 P_i と dP_i は，図 2 に示のように通過点とそれに対応する微小移動量のことである。なお， dP_i は正負の範囲の値をとるため， P_i は移動によって正方向と負方向のどちらへも移

Table 1. The value of parameters for S-System.

Number of passing points	3, 4, ..., 15
K_{fit}	0.81
Gain	3
Population size	300
Maximum generation $Gene_{max}$	100
Threshold fitness Fit_{TH} for algorithm ends	1.0
Range of dP_k	-2 ~ 2
Generation gap	0.5
Crossover rate	0.5
Tournament size	3
Limitation of the number of homogeneities	30
Mutation rate of passing point	0.5
Mutation rate of dP_k	0.5

動可能である。例えば、図 1 において P_2 は P_3 方向（正方向）へも P_1 方向（負方向）へも移動する。この操作を、遺伝子を構成する全通過点に対して行う。

- (7) 2.5 節に基づいて、それぞれの個体の適応度を計算し、 $Energy_p$ に格納する。
- (8) $Energy_p$ の中で最大の値が、しきい値 Fit_{TH} を超えると終了する。これは、手書き曲線と一致する B-spline 曲線を発見したことになる。
- (9) 世代 g が、終了世代 $Gene_{max}$ を超えると終了する。
- (10) 次世代生成ルーチンが呼び出される。詳細は 2.7 節を参照されたい。その後、世代 g が 1 加算され、処理(4)へ戻る。

2.7 次世代生成ルーチン

次世代生成ルーチンでは、優秀な個体を次の世代に残すために実行される。そのフローチャートを図 8 に示す。詳細は以下のとおりである。

- (a) 現世代の個体を適応度の高い順に Par 個選択し、それらの個体を次世代にそのまま残す。これは、ジェネレーションギャップの概念である⁽¹¹⁾。そのための戦略として、エリート保存戦略を採用した。
- (b) 個体の番号 p を 2 にセットする。以下の(c)~(g)のフローを繰り返すことによって、次世代に ($Pop - Par$) 個の個体を生成する。
- (c) トーナメント戦略により個体を選択する。
- (d) 選択された個体が、有性生殖可能かどうかを判定する。有性生殖ができる場合は(e)を実行する。有性生殖ができない場合は(f)を実行する。
- (e) 選択された個体の交叉をする相手を探し、その個体との交叉により 2 個の個体を生成する。次に(g)へ進む。
- (f) 無性生殖により 2 個の個体を生成する。

- (g) 生成された 2 個の個体に対して、突然変異率に基づいて遺伝子の一部を変更する。以上の手順により Pop 個の個体が生成される。

3. 実験結果

提案手法の有効性を確かめるために評価実験を行った。実験は 2 つのケースについて行った。第一のケースは sin カーブに似た単純な手書き曲線からの B-spline 曲線生成、第二のケースは、ひらがなの“の”に似ているが曲率が至る所で変化する複雑な手書き曲線からの B-spline 曲線生成である。実際の利用形態において、複雑な手書き図形も複数の曲線の集まりとして考える場合、この 2 つの課題の組み合わせで対応できると考えられる。実験に用いた計算機は、Intel(R) Core(TM)2 Duo E8600 3.33[GHz]/RAM 3.25[GB]である。

3.1 単純な曲線

用いた手書き曲線を図 9(a)に示す。なお探索に使用したパラメータは表 1 のように設定した。これらのパラメータは予備実験を通じて経験的に定めたものである。微小移動量の範囲は、あまり大きすぎると収束しなくなるため -2 ~ 2 の範囲とした。同種数の制限は、一般に、GA の集団数は 30 ほど確保しないと適切に進化が行われないため 30 とした。微小移動量の突然変異率は、通過点の突然変異率と同じ値とした。通過点数 3 ~ 15 の個体をランダムに 300 個用意し、100 世代までの試行を 100 回繰り返した。CPU 時間は 100 回試行の平均で 20.57[sec]であった。結果の例を図 9(b), (c), (d)に示す。図 9(b)は通過点数 5 の個体が最大適応度として得られた試行の例である。図 9(c)は通過点数 6 の個体が最大適応度として得られた試行の例である。図 9(d)は通過点数 7 の個体が最大適応度として得られた試行の例である。図中の (○)が探索によって抽出された通過点を表している。(●)は(○)を逆変換して得られた制御点を表している。図 9(b), (c), (d)ともに生成された B-spline 曲線と元の手書き曲線の両方を描画している。図 9(b)は図 9(c)と比べて通過点数が 1 少ないため、生成された B-spline 曲線が手書き曲線から若干乖離している部分がある。しかし、生成された B-spline 曲線は元の手書き曲線の品位をほとんど維持している。図 9(c), (d)では一本の曲線しか見えないが、実際には手書き曲線と生成した B-spline 曲線が一致している。図 9(d)は、図 9(c)と比べて通過点数が 1 多いが、生成された B-spline 曲線の品位は同じであるため、最適な通過点数は 6 といえる。これにより、提案手法によって少ない通過点数で元の手書き曲線とほぼ一致する B-spline 曲線が自動生成されることが示された。なお、100 回の試行を通して、最大適応度として得られた個体の内訳は、通過点数 5 の試行が 15 回、6 が 66 回、7 が

(a) Simple handwritten curve.

(b) B-spline in case of 5 passing points.

(c) B-spline in case of 6 passing points.

(d) B-spline in case of 7 passing points.

Fig.9. B-spline curve generated from simple curve.

(a) Complex handwritten curve.

(b) B-spline in case of 15 passing points.

(c) B-spline in case of 16 passing points.

(d) B-spline in case of 17 passing points.

Fig.10. B-spline curve generated from complex curve.

19回となり、通過点数6が最も多く得られ、最大でも7であった。

3.2 複雑な曲線

単純な曲線は、アルゴリズムの有効性を明確に示すための実験である。しかし、実際の利用形態においては、より複雑な曲線が使用される場合もある。そこで本実験では、ひらがなの“の”に似た手書き曲線(図10(a)参照)を元に、B-spline 曲線を生成する。パラメータは通過点数 3 ~ 31, $k_{fit}=0.7$ で行い、その他のパラメータは表1と同様である。通過点数 3 ~ 31 の個体を 300 個用意し、100 世代までの試行を 100 回繰り返した。CPU 時間は 100 回試行の平均で 33.3[sec]であった。実験結果の例を図 10(b), (c), (d)に示す。図 10(b)は図 10(c)と比べると、通過点数が少ないため生成された B-spline 曲線は手書き曲線から若干乖離している部分がある。しかし、元の手書き曲線を重ねて表示しなければ、違いがわからない程度には品位を維持している。通過点数 16 の場合は、図 10(c)に示すように一本の曲線しか見えないが、実際には手書き曲線と生成した B-spline 曲線がほぼ一致している。図 10(d)は、図 10(c)と比べて通過点数が 1 多いが、生成された B-spline 曲線の品位は同じであるため、最適な通過点数は 16 といえる。これらの結果により、提案手法の有効性が明らかになった。

3.3 その他の曲線

本節では、他の手書き図形についても本提案手法が適用可能かを、2 種類の図形を用いて検証した。使用した手書き図形と生成された B-spline 曲線を図 11 に示す。

実験条件は 3.2 節と同様である。図 11(a)は、渦巻きを用いて実験した結果であり、通過点数は 24 であった。図 11(b)は、1 本の手書き曲線中に交差点を 1 個持つ課題であり、通過点数 12 の個体が最大適応度に達した。各図ともに、一本の曲線しか見えないが、実際には手書き曲線と生成した B-spline 曲線がほぼ重なっている。

これにより、3.2 節で用いた曲線以外の複雑な手書き曲線に対しても、提案手法によって B-spline 曲線が再現可能であることが示された。

4. おわりに

本論文では、進化論的手法に基づく B-spline 曲線自動生成アルゴリズムを提案した。進化論的手法の一つである S-System の概念を適用し、通過点数が可変長の遺伝子を定義し、B-spline 曲線の自動生成を試みた。その結果、少ない通過点数と制御点数で手書き曲線にほぼ一致する B-spline 曲線を生成できることがわかった。

進化論的手法全般にいえることであるが、試行によって生成される通過点数が異なる。また、計算時間が数十秒単位にかかる。今後の課題として、安定して毎回少ない通過点数を得る方法への改良と、マルチスレッド化等

(a) Whirlpool.

(b) Other complex curve.

Fig.11. B-spline curve generated from other complex curves.

による応答時間の削減があげられる。また、全ての図形に適用できるパラメータの組み合わせの探索、より実用的な課題への適用を試みたい。

文 献

- (1) 金元敏明:「CAEのための数値図形処理」, 共立出版株式会社, 1994
- (2) Michael Revow, Christopher K.I. Williams, and Geoffrey E. Hinton : “Using generative models for handwritten digit recognition”, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 18, No. 6, pp. 592-606, 1996
- (3) 加藤毅, 大町真一郎, 阿曾弘具:「伸縮変形モデルを用いた手書き文字認識」, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J83-D-II, No. 12, pp. 2578-2586, 2000
- (4) 尾崎弘明, 林長軍, 麻生京子:「B スプライン制御点最適化によるマニピュレータ障害物回避軌道の生成」, 日本機械学会論文集 C, Vol. 61, No. 586, 321--326, 1995
- (5) J. Koza : “Genetic Programming II”, Auto Discovery of Reusable Subprograms, MIT Press, 1994
- (6) S. Serikawa and T. Simomura : “Proposal of a system of function-discovery using a bug type of artificial life”, IEEJ Trans. on Electronics, Information and Systems, Vol. 118-C, No. 2, pp. 170-179, Feb. 1998
- (7) S. Serikawa, B. B. Chhetri, and T. Simomura : “Improvement of the

search ability of s-system (a function-discovery system)", IEEJ Trans. on Electronics, Information and Systems, Vol. 120-C, No. 8/9, pp. 1281-1282, Aug./Sep. 2000

- (8) 黒瀬能幸：「3次元図形処理工学」，共立出版株式会社，1999
- (9) Iba, H., Higuchi T., de Garis, H, and Sato, T. : "Evolutionary Learning Strategy using Bug-Based Search", Proc. of the 13 Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI-93), Vol. 2, pp.960-966, 1993
- (10) Iba, H. : "Genetic Programming", Tokyo-Denki-Daigaku shuppan, p. 141, p. 204, 1996
- (11) D. Goldberg and K. Deb : "A Comparative Analysis of Selection Schemes user in Genetic Algorithm", Foundations of Genetic Algorithms, G.J.E. (ed.) Morgan Kaufmann, 1991

齊藤 光俊

2008 年九州工業大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。同年 4 月独立行政法人科学技術振興機構研究員，2011 年奈良先端科学技術大学院大学特任助教，2013 年新潟経営大学准教授，現在に至る。博士（工学）。演算器アレイ型アクセラレータ，人工生命の研究に従事。

芹川 聖一

1986 年熊本大学大学院工学研究科電子工学専攻修了。同年東京エレクトロン株式会社入社。1990 年九州工業大学工学部助手，2000 年同大学助教授，2004 年同大学教授，現在に至る。工学博士。知能情報処理，知的センシングの研究に従事。