

# ベジエ曲線の近傍可能性空間の視覚化と触覚インタラクティブハードウェアの開発に関する研究

オウ ショウトウ<sup>1,a)</sup> 長谷川 敦士<sup>1</sup>

**概要：**本研究は、ベジエ曲線の生成アルゴリズムとインタラクションモデルに基づき、ベジエ曲線の近傍可能性空間の概念を提案している。これより曲線のインタラクションプロセス中の可能な分布状況を記述し、リアルタイムの可視化レンダリング案も提案した、また、この概念に基づいて開発された触覚インタラクティブハードウェアは、ユーザーがより直感的かつ直接的にベジエ曲線と交流することを可能にし、曲線の本質への理解を深めることを目指している。

## 1. はじめに

デジタルグラフィックデザインおよびコンピュータグラフィックスの分野において、ベジエ曲線は基本的かつ強力なツールである。1970年代から広く採用されているベジエ曲線は、シンプルなグラフィックデザインから複雑なコンピュータ支援設計（CAD）システムに至るまで、多岐にわたる応用を見せてきた。しかし、その広範な応用にもかかわらず、ベジエ曲線に対する直感的な理解とインタラクションの方法には依然として課題が存在する。[1][2][3] 本研究は、この古典的なツールの新たな領域を探求し、ベジエ曲線の「近傍可能性空間」の計算と可視化を通じて、ユーザーの理解とインタラクション体験を向上させることを目指している。

「近傍可能性空間」とは、特定のベジエ曲線の周辺で生成可能な曲線群を指す。本研究ではまず、ドラッグアルゴリズムを使用して近似曲線のシリーズを生成し、これらの曲線が影響を与えるピクセルポイントに基づいてグレースケールの画像をレンダリングする。この画像は、各ピクセルポイントの近傍可能性を描写し、そのグレースケールの値が高いほど多くの曲線によってカバーされていることを示す。この方法により、ベジエ曲線の変動可能性という抽象的な概念を、ユーザーが直感的に理解できる視覚表現に変換する。

また、近傍可能性空間のグレースケール画像は高さモデルに変換可能であり、これは私たちにこの概念をさらに具体化するための着想を与えた。この空間を物理的な山脈や面団のように想像することで、理解の直感性を高めるだけ

でなく、新しいインタラクション方式の開発の可能性を提供する。したがって、本研究では、触覚インタラクティブデバイスを通じてユーザーがこの空間を「触れる」ことができるようにする方法をさらに探求する。[3][4]

この目的を達成するために、新型の触覚インタラクティブハードウェアを開発する。このデバイスは、 $3 \times 3$ のマトリックスに配置された9本のシリンダーから構成され、ユーザーの手のひらに合うサイズである。ユーザーはこれらのシリンダーを押すことによって、直接ベジエ曲線の近傍可能性空間とインタラクトすることができる。このインタラクション方式は、ユーザーに新しい感覚体験を提供するだけでなく、ベジエ曲線への理解をより深め、直感的にする。

## 2. ベジエ曲線の生成アルゴリズム

ベジエ曲線の数学的基礎は、制御点を用いた曲線の生成に関する理論に基づいている。この曲線は、一定数の制御点を通じて、滑らかな曲線を定義する。制御点の数は、曲線の次数を決定し、その形状の複雑さを示す。例えば、3次のベジエ曲線は4つの制御点を用いて表現され、これにより曲線はより複雑な形状を描くことができる。[5]

ベジエ曲線の基本式は、パラメトリック方程式を用いて表される。この方程式では、制御点の座標を用いて、曲線上の任意の点を計算することが可能である。具体的には、ベジエ曲線は、与えられた制御点とバーンスタイン多項式を用いて定義される。バーンスタイン多項式は、曲線の形状を決定するために、各制御点に対する重み付けを行う。

$N$ 次のベジエ曲線は、 $N+1$ 個の制御点を持つ（曲線の始点は第1の制御点とされ、終点は最後の制御点とされる）。その一般形式のパラメトリック方程式は以下の通りである：

<sup>1</sup> 武蔵野美術大学

<sup>a)</sup> settenstudio@gmail.com

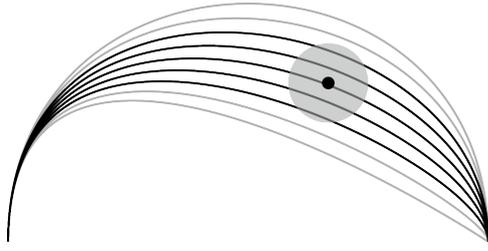


図 1 曲線集合と目標円

$$B(t) = \sum_{i=0}^N b_i \binom{N}{i} (1-t)^{N-i} t^i, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (1)$$

ここで、 $b_i$  は第  $i+1$  の制御点の座標  $(x_i, y_i)$  である。

実際の応用においては、操作が容易な 3 次ベジエ曲線が頻繁に選ばれる。特に、3 次ベジエ曲線は以下の式によって完全に記述されることを指摘する：

$$B(t) = (1-t)^3 e_1 + 3(1-t)^2 t c_1 + 3(1-t)t^2 c_2 + t^3 e_2, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (2)$$

ここで、 $e_1(x_0, y_0), e_2(x_3, y_3)$  は 3 次ベジエ曲線の始点と終点、 $c_1(x_1, y_1)$  と  $c_2(x_2, y_2)$  はベジエ曲線の制御点を表す。本研究での議論は、特に断らない限り、3 次ベジエ曲線に基づいて行われる。

### 3. ベジエ曲線の可能性空間と近傍可能性空間

#### 3.1 ベジエ曲線の可能性空間

まず、 $xy$  平面上の有限数の三次ベジエ曲線集合（以下「B 集合」と記す）を考える。そして、中心が  $(x_0, y_0)$  で半径  $r$  の円（以下「目標円」と記す）を設定する。B 集合に含まれる曲線が目標円と交差する割合と、B 集合内の曲線総数との比率を計算する。B 集合の曲線が空間上で均等に分布し、目標円の半径がゼロに近づくと、この比率は点  $(x_0, y_0)$  における三次ベジエ曲線の分布状況を示すと考えられる。

B 集合が  $xy$  平面上で均等に分布すると仮定すると、平面上の任意の点における分布状況は、ベジエ曲線の生成アルゴリズムにのみ依存する。この分布状況は、三次ベジエ曲線が空間上で取りうるすべての可能性を表している。したがって、この分布状況を平面上のベジエ曲線の「可能性空間分布」として定義することができる。[6]

B 集合内の曲線に対する五次多項式方程式の根を求める過程は、解析的解を持たない。しかし、本研究の関心はベジエ曲線の可能性空間の可視化にあるため、一定の精度を持つ数値解が要求される。そのため、次章では、このアルゴリズムを計算機グラフィックスにおいて数値計算方法に焦点を当て、探求を深める。

#### 3.2 「興味のある空間」近傍可能性空間について

平面上の三次ベジエ曲線の可能性空間は、数学的に一定の意味を持つ。しかし、人間とコンピュータのインタラクションの実際のシナリオに直接適用することは難しい。CAD ソフトウェアにおいてユーザーが曲線と交互する際、明らかに特定の「興味の範囲」が存在する。以下では、この「興味の範囲」を定義し、コンピュータグラフィックスにおける計算方法を考察する。[7]

##### 3.2.1 ベジエ曲線の一般的なドラッグ調整アルゴリズム

ユーザーがベジエ曲線を操作・調整しようとする際、必ず元の曲線に関連する特定の点を基準にする。一般的なインタラクション形式として、ユーザーがマウスでベジエ曲線の始点を新しい位置にドラッグし、曲線を変更するケースを考える。ベジエ曲線のパラメトリック方程式に基づくと、始点  $e1(x_0, y_0)$  がから  $e1'(x'_0, y'_0)$  に変わる際の方程式の変化は以下の通りである：

$$B(t) = (1-t)^3 e'_1 + 3(1-t)^2 t c_1 + 3(1-t)t^2 c_2 + t^3 e_2, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (3)$$

しかし、曲線上の特定の点を直接ドラッグして交互する場合、変化アルゴリズムはより複雑になる。De Casteljau のアルゴリズムを用いて再帰形式で逆算する方法の一つは、現在のドラッグ点をベジエ曲線の基底線上に投影し、同じパラメータ  $t$  値を保持して新しい曲線を得ることである。[8]

この方法は数学的には「直観的」であるが、インタラクションの効果としては「直観的」ではないことが多い。特に、ユーザーのドラッグ点が基底線の近くを通過する際、曲線は時に非常に急激に変化する。この急激な変化はユーザーに混乱を引き起こし、インタラクションのブレイクダウンを招くことがある。

この問題を解決する一つの方法は、上述の方法と曲線作成部分の方法を組み合わせることである。具体的には、「変更されていない  $t / e1 / e2$ 」の曲線と、始点/カーソル/終点を通る「理想化された」曲線を生成し、理想化された  $t$  値を持つ後者と、これら二つの曲線間での挿値を行う [8]。このドラッグアルゴリズムの下では、ある挿値重みを指定する必要がある。この挿値重みによって、最終的に得られる曲線が「理想化された」曲線（あるいは逆に「数学的直観」の曲線）にどれだけ近いかを決定する。

この解決策以外にも、より複雑な解決策が存在するが、前述の通り、一見単純な「ベジエ曲線のドラッグ調整」の背後には複雑なアルゴリズムが存在する。すべてのベジエ曲線を使用する CAD ソフトウェアは、このアルゴリズムをユーザーのインタラクション直観に合わせて調整・評価するが、それにもかかわらず、ユーザーがベジエ曲線をドラッグする際には「予期せぬ」結果が頻繁に発生する。[1][2][3]

### 3.3 近傍可能性空間の定義と計算

これからでは、ユーザーがベジエ曲線の本質を直感的に理解できるようにするため、ベジエ曲線の「近傍可能性空間」を定義し、計算する方法を提案する。この可能性空間は、ユーザーが曲線をドラッグ操作する際に、視覚化される。

与えられた特定のドラッグ調整アルゴリズムを適用したベジエ曲線において、ユーザーがドラッグ操作を行う際、ドラッグ点を中心とした特定半径範囲内のベジエ曲線分布を計算する。これは、ある入力重みを考慮した状態での分布であり、この分布がそのベジエ曲線に対する近傍可能性空間を表す。これは、現在のドラッグ点に対する操作がもたらす可能性のある結果曲線の分布を予測するものである。前述の全体的な可能性空間と同様に、解析解を直接得ることはできないが、数値解法で十分な精度を得ることが可能である。

ここで強調すべきなのは、近傍可能性空間の計算が特定の入力重みを前提とする。全体的な可能性空間が考慮する曲線集合は平面上に均等に分布しているが、近傍可能性空間は単にドラッグ点を中心とする円形空間の部分集合ではない。ここでの入力重みは、所定のドラッグ調整インタラクションモードに適合するように、元々均等に分布している曲線に位置に依存する計算重み関数を適用することを意味する。

最も単純な線形重み関数を適用する場合、ドラッグ点での重みは1とし、その他の位置での重みはドラッグ点からの径方向距離に応じて線形に減少し、関心のある最大距離 $r$ でゼロになる。このように、ユーザーが曲線をドラッグする際の各過程で期待される可能性空間のプレビューをより適切に表現することができる。どの入力重み関数がより良い結果をもたらすかについては、本論文の議論範囲外である。本論文の後半では、上述の線形重み関数を用いて近傍可能性空間を計算することとする。

### 3.4 近傍可能性空間の可視化レンダリング

前節で定義された基準に基づき、特定のベジエ曲線における特定のドラッグ点の近傍可能性空間の数値計算及び可視化レンダリングが実施される。まず、ベジエ曲線の4つの制御点の座標と現在のドラッグポイントの座標を決定する。次に、初期ドラッグポイントを中心に、特定のステップ長を用いて二次元空間内にドラッグポイントの配列を作成し、これらの点を初期ドラッグポイントを中心とする半径 $r$ の興味のある空間内に制限した。

続いて、これらのドラッグポイント集合に基づいて、興味のある空間内のすべての最終ベジエ曲線を計算する。これらの曲線は、次にラスターライズレンダリングプロセスに送られる。このプロセスでは、GrafEq 描画ソフトウェアのラスターライズアルゴリズムを参考に [9]、各ベジエ曲線に対応するグレースケール画像を生成する。ラスターライズレンダリングは、曲線を離散化することで実現され、これにより曲

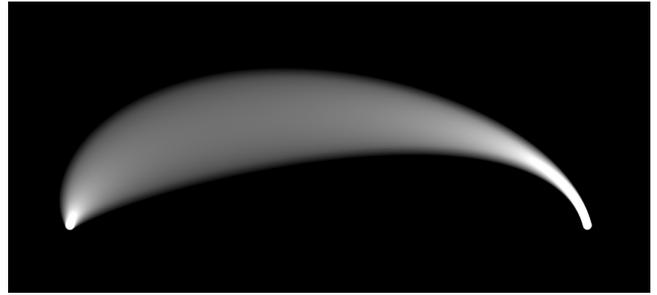


図 2 近傍可能性空間を可視化する例

線の視覚的な連続性が保証されると同時に、後続の処理のための必要なデータ基盤が提供される。

さらに、レンダリング効果を正確に制御するため、生成された曲線のドラッグポイントが初期ドラッグポイントからの距離に基づいて、線形入力重み付け関数を適用し、各曲線のグレースケール画像の重みを調整する。この重み調整により、視覚上の重要性を細かく制御し、最終的なレンダリング画像において初期ドラッグポイントに近い曲線を強調することができる。

最後に、すべての単一曲線のグレースケール画像を重ね合わせ、結果を正規化することで、ベジエ曲線の現在のドラッグポイントの近傍可能性空間のレンダリングを完成させる。

本研究では、Unity の ComputeShader を利用し、近傍可能性空間の並列計算及びラスターライズレンダリングが行われる。2732 × 2048 の解像度で、30FPS のフレームレートを維持しつつ、約 600 本の曲線から成る近傍曲線集合の重ね合わせレンダリングが実現され、リアルタイムでのインタラクションが可能な近傍可能性空間のレンダリングが達成される。[6][10][11]

## 4. 近傍可能性空間を利用したインタラクション体験の改善についての考察

本章では、ベジエ曲線におけるドラッグ操作の際、近傍可能性空間の可視化がユーザーの体験をどのように改善するかについて考察する。近傍可能性空間は、ユーザーが曲線を操作する際の直観的な理解を促進し、より精確かつ効果的なインタラクションを実現するための重要なツールである。

近傍可能性空間の可視化は、ユーザーがベジエ曲線を操作する際に、その結果を事前に予測できるようにすることで、インタラクションの直観性を高める。特に、曲線の形状が複雑で、小さな操作が大きな変更をもたらす場合には、この可視化は非常に有効である。ユーザーは、操作前に可能な結果のプレビューを視覚的に確認でき、より意図に沿った調整を行うことができる。近傍可能性空間の導入により、ユーザーは曲線の操作に対する自信を持つことができるようになる。操作の結果が直観的に理解できるため、試行錯誤の回数が減少し、操作の効率が向上する。また、曲線の調整

が直観的になることで、ユーザーはより創造的なデザイン作業に集中できるようになる。

このアプローチは、計算機グラフィックス、特に CAD ソフトウェアやデジタルアートツールにおいて特に有効である。近傍可能性空間の可視化を通じて、ユーザーは曲線の操作がもたらす影響をより深く理解し、より洗練されたデザインを実現できるとみられている。

上述の可視化計画において、近傍可能性空間はリアルタイムに生成されるグレースケールの画像に変換され、ユーザーがベジエ曲線をドラッグ調整する際に同時に表示される。この方法は伝統的なインタラクション手法と比較して改善されているが、ベジエ曲線の生成アルゴリズムに対するユーザーの理解をより深めるために、より直観的でユーザーの直感に合ったインタラクション手法を求めている。

このプロセスで、以下の興味深い現象と可能性が発見された：

- (1) **近傍可能性空間と高さモデルの相互変換**：生成されたグレースケール画像は高さモデルに変換することができる。画像の各ピクセル点には、そのグレースケールを表すユニークな値があり、これは同時に現在のドラッグ点でのベジエ曲線の該当ピクセル点での分布を表している。画像で明るい（白い）部分ほど多くの曲線が通過することを意味し、逆に暗い部分は少ない。この画像を高さモデルに変換すると、高い部分はより多くの曲線が通過することを示し、感知可能な三次元構造を形成する。
- (2) **高さモデルによるインタラクションの次元拡張**：グレースケールを高さで置き換えると、二次元平面に隠された抽象的な数値が、直感的に感じられる三次元の高さに変わる。この変化は単なる「可視化」プロセスではなく、「触れる」などの多感覚体験へと変化する。この三次元表示方式により、ユーザーはベジエ曲線の分布と変化をより直観的に理解することができる。
- (3) **「視覚」から「触覚」への認知拡張**：インタラクションを「視覚」から「触覚」へ拡張することは、技術的な革新でありながら、ユーザーがベジエ曲線を理解する上での深層的な影響をもたらす。この多感覚体験方式により、ユーザーは曲線の空間分布と動きを直観的に感じることができる。触覚の参加により、ユーザーの曲線の形と流れに対する理解は単一の視覚イメージから、より立体的で直観的なものに変化する。このような体験は、ユーザーがベジエ曲線の特性を深く理解するのに役立つ。特に複雑なデザイン問題を扱う際に、曲線の微妙な変化をより直接的に感じ取ることができ、設計意図の正確な把握を促進する。[1][3]

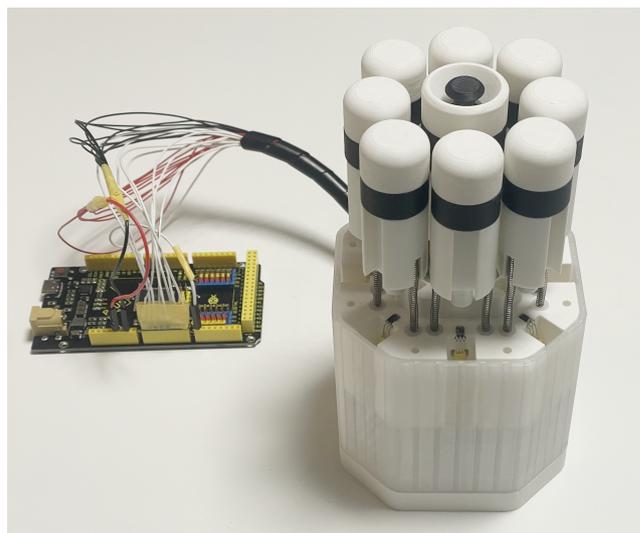


図 3 ベジエ曲線の触覚インタラクティブハードウェア

## 5. ベジエ曲線の触覚インタラクティブハードウェアの開発

現代の人間とコンピュータのインタラクション領域において、触覚入力を利用した直感的なインタラクション方法が注目されている。例えば、3Dconnexion の SpaceMouse マウス [12]、MIT Media Lab の inFORM Tangible Media Interface [13]、Geomagic Freeform システム [14] などは、先進的な技術を活用して、ユーザーに特別な体験を提供している。これらのデバイスは操作の直感性を高めるだけでなく、ユーザーがデザインオブジェクトを理解し感知する能力も強化している。

ベジエ曲線の応用において、新しいタイプの触覚インタラクティブハードウェアの導入は、探求に値する試みである。このデバイスは直感的なインタラクション体験を提供するだけでなく、ユーザーがベジエ曲線の特性をより深く理解するのに役立つ。特に、第 2 章で詳述した近傍可能性空間の概念を組み合わせることにより、ユーザーは触覚インタラクティブハードウェアを通じて、曲線をより直接的に「感知」し「操作」することが可能となる。物理的な操作、例えば高さマップに変換された空間を押ししたり調整したりすることにより、より直感的なインタラクションとより深い理解を実現する。

### 5.1 ベジエ曲線の触覚インタラクションデバイスの設計

インタラクションの直感性、学習コスト、技術的实现の困難さなど、多面的な考慮を総合した結果、筆者は以下に示す図のようなベジエ曲線の触覚インタラクティブハードウェアを設計した。[13] 本デバイスの主体は、上下に移動可能な 9 本のシリンダーで構成されている。これらのプッシュカラムはおおよそ 3x3 の方陣を形成しており、外側のシリンダーの直径はそれぞれ 22.5mm である。外側のシリンダーは中心のシリンダーから 45° の位相差を持って 2 組に分けら

れ,90°の間隔で円周上に配置されている.2組のシリンダーはそれぞれ中心のシリンダーから29mmおよび32.5mmの距離にある.中心のシリンダーはより太く,その上部には凹みがあり,その凹みの中にはミニジョイスティックが埋め込まれている.ミニジョイスティックの最高点は凹みの縁よりも低く設計されており,誤操作を防ぐことができる.

各シリンダーの内部は,2本の直径2mmのステンレス製のシャフトとナイロン製のスライドベアリングで構成されたスライド副によって制約されており,上下に15mmの動きが可能である.シャフトには直径3mm,線径0.3-0.2mm,自由長50mmの圧縮ばねが取り付けられており,構造のリセットと押し下げ時の機械的な触覚フィードバックに使用される.

シリンダーの下部にあるフレームには,49E磁気ホールセンサーが固定されており,シリンダーの動きに従って上下する直径5mm,高さ10mmのネオジウム磁石がシリンダーと同軸で埋め込まれている.ネオジウム磁石とホールセンサーの距離はシリンダーの動きによって1mmから16mmの範囲で変化する.ホールセンサーの出力電圧を測定することで,現在のシリンダーの押されている度合いを正確に知ることができる.[15]

また,各シリンダーには行程制限スイッチが取り付けられており,シリンダーが行程の上限および下限に達したときに特定の機械構造によって触発される.この信号はマイクロコントローラーに送信され,ホールセンサーの初期化とドリフト防止の校正に使用される.

マイクロコントローラーには,多数のアナログ入力ポートを持つArduino Mega2560が採用されており,9本のシリンダーの現在の押し状態をリアルタイムで上位のコンピュータにシリアル通信によって伝達する.

## 5.2 触覚インタラクティブハードウェアの使用法の想定

本触覚インタラクティブハードウェアは,ベジエ曲線の調整を目的としており,直接近傍可能性空間と交互に作用することにより,結果として得られる単一の曲線を解析することを意図している.操作方法は以下のように考えられている:

ディスプレイには,単一のベジエ曲線と,曲線上の現在のドラッグポイントが表示される.ユーザーがこのベジエ曲線を調整したい場合,まず中心のシリンダー上にあるミニジョイスティックを使用して,ディスプレイ上のドラッグポイントの位置を調整する.ドラッグポイントの位置に変更があると,上位のコンピュータは新しいドラッグポイント周辺の近傍可能性空間の高さモデルを自動的に計算し,表示する.ユーザーがドラッグポイントを望む位置に移動した後,手のひら全体をシリンダーアレイの上に置き,全てのシリンダーを覆う.そして,手のひらに力を加え,ディスプレイ中の近傍可能性空間の高さモデルを押ししたり圧縮し

たりすることを想像する.各シリンダーの下にあるホールセンサーはユーザーの現在の圧力状況を検知し,特定のアルゴリズムを通じてユーザーの圧力方式をシミュレートし,コンピュータに入力し,ディスプレイ上の近傍可能性空間の高さモデルに対応する変化をもたらす.ユーザーの入力が終わると,ディスプレイ上の近傍可能性空間のビジュアルは徐々に消え,変化後の高さモデルから逆算して得られた単一のベジエ曲線が残り,ベジエ曲線の調整が完了する.

## 5.3 触覚インタラクションデバイスの実装したアルゴリズム

本触覚インタラクションデバイスは,内部アルゴリズムによりユーザーの触覚入力をシミュレートし再現する.

デバイスは49Eホールセンサーを用いて各シリンダーが現在押されている程度を検出する.検出された値は正規化され,高さデータとして配列に保存される.9点の高さデータとそれらの物理的位置から,ユーザーの手のひらによって押し下げられた後のシリンダー配列の頂部に形成される曲面が構築される.この曲面は4つの四辺形面から成り立っていると考えられる.

これら4つの四辺形面の内部法線をそれぞれ計算し,適切な重みを付けて合成法線方向を算出する.これが模擬された押し方向として用いられる.一方で,Unity内で事前にベジエ曲線の現在のドラッグポイントにおける近傍可能性空間を計算しており,リアルタイム解析を保証するため,計算に使用される曲線集合を大幅に単純化し,計算された近傍可能性空間をスパースグリッドによる高さマップに変換する.

センサーデータから計算された模擬押し入力と単純化された近傍可能性空間の高さマップを組み合わせて物理的インタラクションを解析する.現在の模擬押し入力の下での近傍可能性空間の高さマップの変化後の結果を得る.そして,この結果に基づいて逆重み付け平均を行い,押し調整された単一のベジエ曲線を導出する.

## 6. 結論と展望

本研究では,ベジエ曲線の近傍可能性空間という概念を提案し,アルゴリズムによって生成された曲線の分布を記述する理論的および視覚化の方法を見出した.触覚インタラクションデバイスを用いた新たなインタラクション方式に基づき,ユーザーが直感的かつ直接的にベジエ曲線と交流できるようにし,曲線の本質への理解を深めることを目指した.新奇なインタラクションを通じて,ベジエ曲線の生成アルゴリズムに対して興味を持たなかった芸術家やデザイナーの態度に変容をもたらす,理科と芸術が融合する新たな人材育成の可能性に光を当てたいと考える.

正式な評価は未だ実施されていないが,デザイン学や芸術学の背景を持つ約15名が本研究で開発した近傍可能性

空間の可視化方法と触覚インタラクションデバイスを体験し、そのほとんどから肯定的な反応を得た。被験者は背後の原理やベジエ曲線の具体的な生成プロセスに対する関心を示し、これは望ましい結果である。近傍可能性空間の可視化は、曲線の編集に複数の調整結果を同時にプレビューする機能指向のアプローチであり、異なるインタラクション方式に対応可能である。一方で触覚インタラクションデバイスは機能指向ではない。より直感的で魅力的なインタラクションを追求し、近傍可能性空間の直観的な意味を理解し、ベジエ曲線の本質への理解を深めることを目的としている。

近傍可能性空間の概念は、ベジエ曲線に限定されず、理論的には任意のアルゴリズムによって生成される曲線に適用可能である。本研究で提案された理論により、ベジエ曲線を含む算法生成曲線に対するユーザーの理解とコントロールが深まり、新たな人材を育成する助けとなると期待される。

一方で、本研究にはいくつかの課題も存在する。近傍可能性空間の取り組みは、具体的なレンダリングの実装に焦点を当てており、厳密な数学的定義を十分に扱っていない。触覚入力装置は3×3のシリンダーアレイを用いたデータ収集に留まり、入力の精度には限界がある。今後は、数学的な側面を補強し、認知実験と組み合わせることで、より洗練された研究を進めたいと考えている。

将来的には、本装置がユーザーの直感的操作で複雑な数学的オブジェクトを深く理解し、創造的な結果を導き出す新たな道を開くことが期待される。ベジエ曲線のような抽象的な概念を、触覚的に感じながら操作することで、デザインの領域は新たな次元に進化していくであろう。今後の研究では、様々なデザインシナリオにこの装置を適用し、その有効性を検証し、触覚インタラクションの新しい基準を確立することを目指す。

## 参考文献

- [1] 渡邊恵太: 融けるデザインーハード×ソフト×ネット時代の新たな設計論, ビー・エヌ・エヌ新社 (2015).
- [2] 緒方壽人: コンヴィヴィアル・テクノロジー 人間とテクノロジーが共に生きる社会へ, ビー・エヌ・エヌ (2021). ISBN-10: 4802511965.
- [3] Card, S. K., Moran, T. P. and Newell, A.: *The Psychology of Human-Computer Interaction*, L. Erlbaum Associates.
- [4] Wiener, N.: *Cybernetics: Or, Control and Communication in the Animal and the Machine*, The MIT Press, second edition, 2019 reissue edition.
- [5] Prautzsch, H., Boehm, W. and Paluszny, M.: *Bézier and B-Spline Techniques*, Mathematics and Visualization, Springer Berlin Heidelberg.
- [6] Marschner, S. and Shirley, P.: *Fundamentals of Computer Graphics*, Fourth Edition.
- [7] Jazzros: Projecting a Point on a Bézier Curve, , available from <https://web.archive.org/web/20140713004709/http://jazzros.blogspot.com/2011/03/projecting-point-on-bezier-curve.html> (accessed 2011-03-19).
- [8] Pomax: A Primer on Bézier Curves, , available from <https://pomax.github.io/bezierinfo/> (accessed 2023-11-28).
- [9] Tupper, J.: Reliable Two-Dimensional Graphing Methods for Mathematical Formulae with Two Free Variables, *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM, pp. 77–86 (online), DOI: 10.1145/383259.383267.
- [10] Technologies, U.: Unity Manual, , available from <https://docs.unity3d.com/Manual/>
- [11] 巴山竜来: リアルタイムグラフィックスの数学ーGLSLではじめるシェーダプログラミング, 技術評論社 (2022).
- [12] 3Dconnexion: SpaceMouse, 3Dconnexion (online), available from <https://3dconnexion.com/jp/spacemouse/> (accessed 2023-12-18).
- [13] Föllmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Hogge, A. and Ishii, H.: inFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints through Shape and Object Actuation, *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, ACM, pp. 417–426 (online), DOI: 10.1145/2501988.2502032.
- [14] Data Design Co., L.: Geomagic Freeform, Data Design Co.,Ltd. (online), available from <https://www.datadesign.co.jp/freeform/lineup/geomagic-freeform/> (accessed 2023-12-18).
- [15] Limited, B. S. M.: AH49E Linear Hall-Effect IC Datasheet (2010).