

タイ・カービングにおける制作手順記述のための デザイン支援システムの設計と開発

佐藤 貴子

Development of a design support system for describing production procedures of Thai Carving

Takako SATO

This paper proposes a design support system that enables the structured description of Thai carving procedures by modeling knife movements as operation primitives. Through a 2D drawing interface enriched with depth and temporal parameters, the system records carving actions as reproducible digital recipes. Geometric primitives, semantic roles, and a path-following local coordinate system allow the representation of symmetrical and layered motifs. A prototype implementation demonstrates that the method effectively captures both carving processes and the physical meaning of each stroke, contributing to digital archiving.

Keywords: Thai carving, design support system, operation primitives, digital craft archiving, multi-channel parameter description

1. はじめに

タイ・カービングは、タイ王国の伝統的な宮廷工芸であり、彫る素材によりフルーツカービング、野菜カービング、ソーブカービング（図1）などとも呼ばれている^{[1][2][3][4][5]}。1本のナイフから生み出される繊細な意匠は、世界的に高い文化的価値を有している。

タイ・カービングの制作工程の記録方法として、現在は主に写真や動画が用いられている。写真は制作過程の彫り跡や完成図を記録できるが、制作過程でのナイフの動きは言葉で注釈をつけなければ表すことができない。一方、動画はナイフの動きを記録



図1 ソーブカービングの例

することができるが、タイ・カービングはナイフを持つ手の動きだけでなく、反対側の手で素材を持つ角度を変えることでもナイフの角度を変えており^[5]、固定視点の動画のみで素材に対してどの程度の角度でナイフを入れているかを把握するのは難しい。素材にナイフを刺したまま少しナイフを湾曲させることで細部を彫ることもあり、ナイフの三次元的な深さや力加減を正確に記録することは困難である。

また、ナイフを斜めにして表面の形の影に別の形を彫る部分が多くあり、既存の3D スキャニング技術で完成した形状を保存することも難しい。

本研究では、伝統的なタイ・カービングのナイフの動きを「動作プリミティブ」として定義し、2D ドローイングの手法を用いて「深さ」と「手順」を同時に記述可能なデザイン支援システムを提案する。本システムにより、職人の技術を再現可能な「デジタル・レシピ」として構造化し、工芸教育や工芸技術のアーカイブの新たな基盤を構築することを目指す。

2. 関連研究

本研究に関連する先行研究を、デジタル・アーカイブと工芸CADの観点から整理する。

無形文化遺産をデジタルで記録する試みは以前より行われてきた。動画により視覚的に保存する方法^[6]、モーションキャプチャ等を用いて身体動作をアーカイブ化する手法^{[7][8]} などがあるが、カービングのような職人の微細な動きとそれによる素材の変容を同時に扱う研究はまだ発展途上である。

一方、3D スキャナやX線CT, NC加工機などを用い、3DCG化したデータから伝統工芸品の製造や製造工程に必要な木型の復元を行う試みが行われている^{[9][10]}。これらは動きを記録するというよりは完成品を復元したり、製造過程で必要な道具を再現したりするなど、形に注目した取り組みといえる。

先行研究の多くは動作の記録、または形状の生成・復元に主眼を置いている。これに対し本研究では、動作と形状の双方を関連づけて記述する新しい枠組みが必要であると考えた。2D の作図操作を通じて3D の彫刻動作と手順の時系列を同時に記述することを目的とし、ナイフの動きをプリミティブに分解したうえで、その動作の意味とともに保持するアプローチは工芸のレシピ化に挑戦する試みである。

3. タイ・カービングの制作工程の分析

タイ・カービングには、素材の表面の文様を彫っていく浮き彫りと、素材を薄い板状にし、ナイフを貫いて穴をあける透かし彫りに大別することができる^[3]。本稿では様々なナイフの動きがみられる浮き彫りに特に着目し、制作工程の分析を行った。

3.1 カービング工程のプリミティブ化

本節では、タイ・カービングにおける身体的動作と素材の物理的特性を分析し、それらを記述するための最小単位である「動作プリミティブ」を定義する。

3.1.1 身体的動作に基づく動作プリミティブの分類

カービングでは、基本的には先端が鋭利なカービングナイフ 1 本で全ての柄を彫る。この時のナイフの動かし方により様々な文様を描いたり柄を立体的に浮き上がらせたりするが、いずれの場合でも「ナイフの先端を素材に刺し、特定の軌跡を描いて抜く」という動きに集約することができる。そこで本研究では、この「ワンストローク」を情報の最小単位と定め、動作の質的違いから以下の3系統に分類した(図2)。

(A) ストローク型: 刃を一定の軌跡に沿って滑らかに移動させる基本動作。垂直に立てて柄のライ

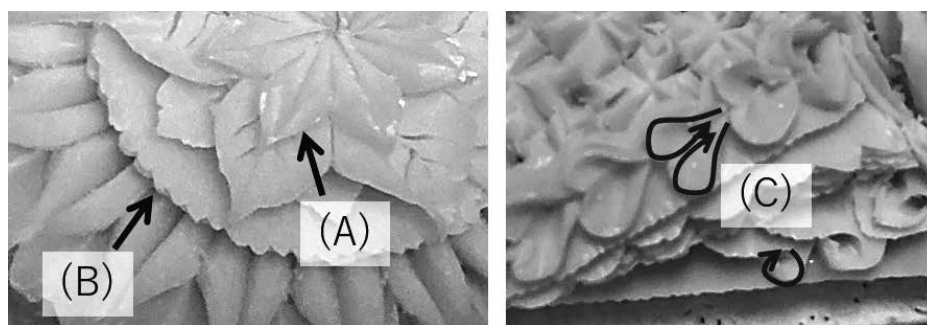


図2 動作プリミティブの種類

ンを作る（切り込み）、刃を寝かせて柄の周りを除去し柄を浮き立たせる（切り取り）、斜めに同じ角度で左右からナイフを入れて溝を彫る、といった目的で行う。

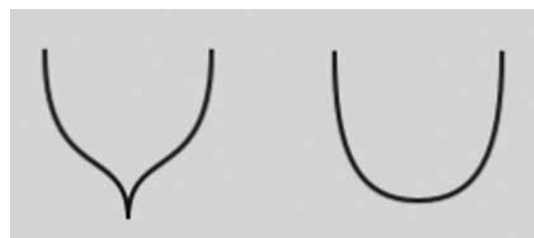
- (B) フリル型：刃を上下左右に小刻みに揺らしながらナイフを進め、鋸歯状の縁を作る動作。全体としてはストローク型に近い軌跡を描きつつ、小刻みな揺らしによりフリルのような細かい柄をつける手法。揺らし具合でフリルの形や大きさを変えることができる^[4]。
- (C) ピボット型：刃先を支点として固定し、刃の腹を雫状または円錐状に回転させる動作。深い穴状の柄をつけることができる^[4]。

本プロトタイプシステムでは、中でも最も汎用性が高く、文様構成の基盤となるストローク型に着目した。さらに対称な柄を描くために欠かせない下書き線を加え、以下の幾何学的・意味論的パラメータへと射影した。

3.1.2 幾何学的プリミティブ：特化型プリミティブによる記述

ナイフがワンストロークで移動する軌跡やガイドとして使う図形として、円、楕円、四角形、直線、ベジエ曲線を幾何学的プリミティブとする。

さらに、カービングにおける伝統的な文様でみられる曲線の「しなり」を効率的に記述するため、汎用的なベジエ曲線に加え、曲率の特性をパッケージ化した2種類の特化型プリミティブを定義した（図3）。



(a) S字 (b) C字

図3 特化型プリミティブ

これらのプリミティブは単なる座標値の集合ではなく、全体の長さに対する制御点の位置比率を変数として保持する。この変数を用いて「完全に同じ柄を並べている」「外側または内側にいくごとに少しずつふくらみを変化させている」という造形要素を数値化して制御することが可能となった。

3.1.3 意味論的プリミティブ：操作の意味による物理作用の規定

幾何学的には同一のパスであっても、それが素材に対してどのような物理作用を及ぼすかにより制作上の意味は異なる。本システムでは、各ストローク・下書きに対し以下の役割（role）を付与し、描画スタイルと連動させている（図4）。

- (A) 切り込み（KNIFE_LINE）：素材に対してナイフを垂直に近い角度で立て、図案の輪郭を確定させる動作。
- (B) 切り取り（KNIFE_EDGE）：確定した輪郭の

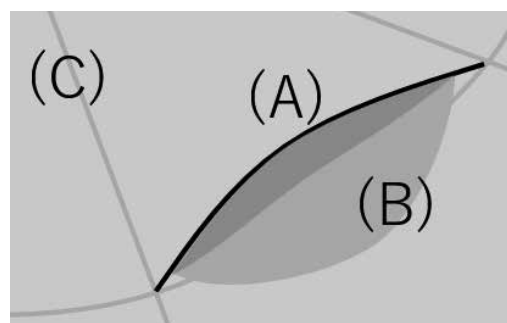


図4 意味論的プリミティブ

外側を斜めにそぎ落とし、立体的な陰影を生じさせる動作。

- (C) ガイド (GUIDE)：物理的な切削を伴わない補助線。対称軸、中心円など、幾何学的な配置の基準として機能する。ナイフの刃は使わず、刃の背やディバイダなどを使って薄く下書きをする。

以上の動作プリミティブを「手順 (Step ID)」として時系列配列することで、単なる完成図ではなく、再現可能な制作プロセスの構造化を実現した。

3.2 プリミティブの組み合わせによる文様の構築

本節では、3.1で定義した「ストローク型」の動作プリミティブを用い、どのようにして具体的な造形へと統合されるかを検証する。検証対象として、S字プリミティブ・C字プリミティブを主体とした基礎的な幾何学文様を用いる。

3.2.1 切削と除去の相補的關係

カービングの工程では、葉脈を描くなどの一部の例外を除き、単一の動作プリミティブではなく「切り込み」と「切り取り」の相補的なペアにより構成される^[3]。これにより切り込みで作られた柄に陰影を加え、目立たせることができる。この「切り込み」「切り取り」のセットをここではユニットと呼ぶことにする。図5のダリア^[2]の柄を例にとると、

「ガイド」：(1段目の前のみ) 中央の円の周囲に等間隔の印をつける

「切り込み」：印の位置を参考に、S字プリミティブで素材に対し垂直に刃を入れ、造形の境界線を物理的に固定する。

「切り取り」：切り込みの裏に斜めに刃を入れ、境界線の裏をそぎ落とし、立体感を出す。

このS字プリミティブの「切り込み」「切り取り」ユニットの繰り返しにより柄が構成される。

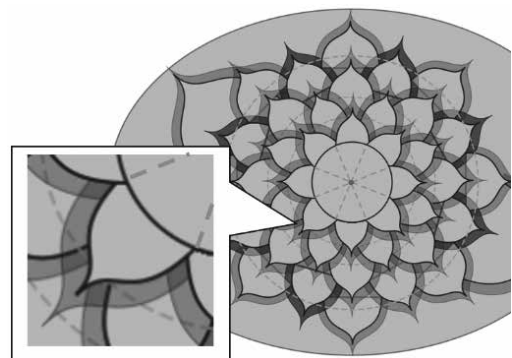


図5 S字プリミティブによるダリア (逆位相配置)

3.2.2 規則的な配置

単一の制作ユニットを配置・複製し、全体の文様を構成する。

ユニット群が基準円から放射状に配置される場合、1つの円周上にユニットを等間隔に配置する。柄の広がりには主に以下の2つの配置パターンが適用される。

逆位相配置：外周に向かって新たな層を構成する際、前層のユニット同士の間隙を埋めるよう、柄半分ぶんずらして次層のユニットが配置される (図5)。

同位相配置：外周に向かって新たな層を構成する際、前層のユニットと同じ位置に次層のユニットが配置される (図6)。

本システムでは、基準となる円周やパスの接線方向を座標軸の起点として等間隔に配置する相対座標系を導入した。これにより、1つのユニットの配置を等間隔に放射状に配置するルールを幾何学的に厳密に記述することが可能となった。

ユニット群は碁盤の目のように配置される場合もある (図7)。これも、直線を基準とした相対座標系を活用することで同様に記述することができる。

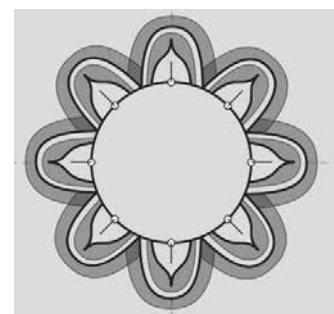


図6 同位相配置の例

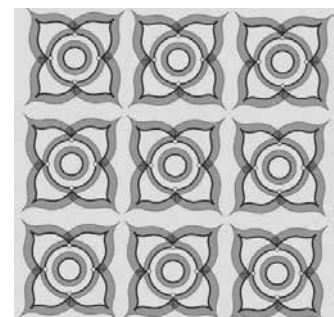


図7 碁盤の目配置の例

3.2.3 手順のシリアル化と可視化

カービングは基本的に素材を削っていく作業である。彫刻の深さは工程が進むにつれて増していくため、同じストロークでも、どの段階で実行するかによって仕上がりが異なってくる。そこで各ユニットが素材上のどの位置に、どの向き・どの大きさで彫られたか、を彫る順に並べることで、制作手順のシリアル化を行う。一方、図形の幾何学的重なり順は基本的に「古いものから新しいものへ下に重なる」ということになる。

3.3 多層構造への展開

これらの配置則を応用し、タイ・カービングで良く用いられるモチーフであるバラを彫る手順を表現する（図8）。

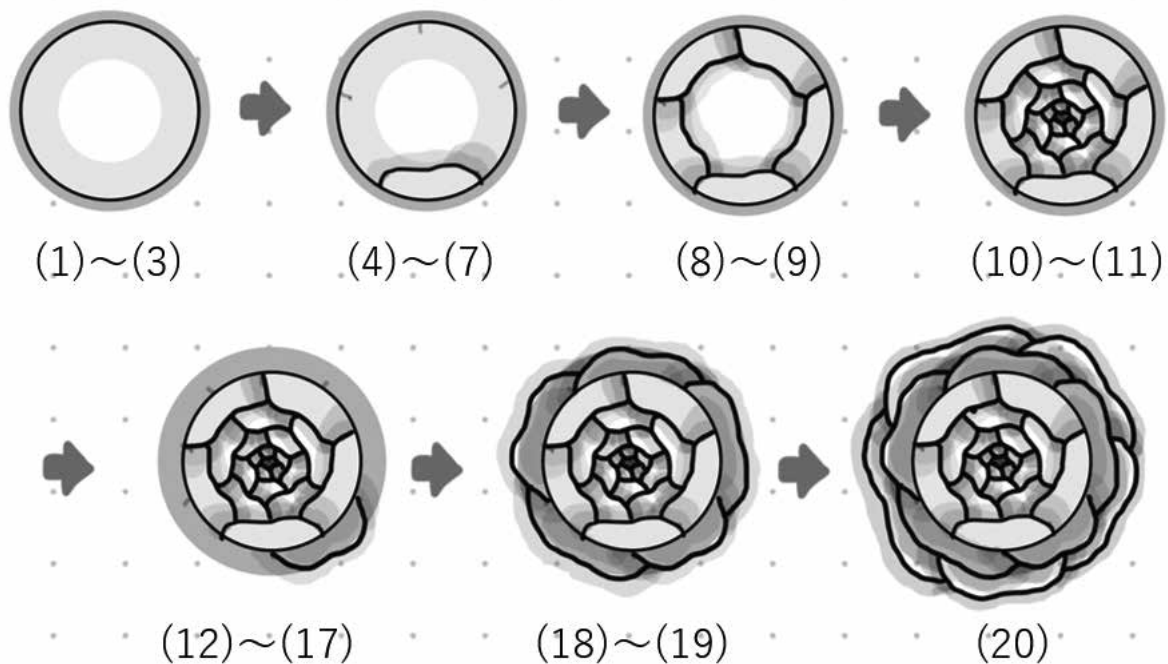


図8 バラのモチーフの制作手順

- (1) 「切り込み」：素材の中心に円の切り込みを入れる。
- (2) 「切り取り」：(1)の円の外側で深い切り取りを行う。
- (3) 「切り取り」：(1)の円の内側の角を取り、伏せたお碗の形に整える
- (4) 「ガイド」：(3)の外周に等間隔に5個、印をつける
- (5) 「切り込み」：(3)で整えたお碗型に、ガイドの点から点へ弧を描くように垂直にナイフを入れる
- (6) 「切り取り」：(5)の内側を薄く削る
- (7) 「切り取り」：さらに(6)の片側の角をとりなだらかにする
- (8) 「切り込み」「切り取り」：(7)で整えた1つ前の花びらの裏から少し重なるようにナイフを入れ、(5)~(7)の動作を行う
- (9) 「切り込み」「切り取り」：(8)をあと3回繰り返し、5枚の花びらにする。ただし5枚目の花びらは左右ともに既にある花びらの下に重ねる。
- (10) 「切り取り」：内側の角を丸く削り、お碗を伏せた形に整える。
- (11) 「切り込み」「切り取り」：(4)~(10)を内側に繰り返し、中央まで行う。ただし花びらの位置は直前の段と互い違いの位置とする。
- (12) 「切り取り」：(2)の位置で少し広く切り取りを行う。
- (13) 「ガイド」：(12)の外側に、内側 ((3)~(9)) の5枚と互い違いになる位置に5個の印をつける。

- (14) 「切り取り」：(13)のうち隣り合う2点のガイドの間を薄く厚みを変えながら切り取り、花びらの内側のゆるい凹凸をつける。
- (15) 「切り込み」：(14)で選んだ2点をつなぐように曲線で花びら型を描く。この時刃はすこし外の方を向ける。
- (16) 「切り取り」：(15)の外側を切り取り、花びらを浮き立たせる。
- (17) 「切り取り」：(16)の片側の角をとりなだらかにする。
- (18) 「切り込み」「切り取り」：(17)の隣に、(15)の花びらに少し重なるように次の点まで(15)～(17)を行う。
- (19) 「切り込み」「切り取り」：(18)をあと3回繰り返す、5枚の花びらにする。ただし5枚目の花びらは左右ともに既にある花びらの下に重ねる。
- (20) 「切り込み」「切り取り」：(12)～(19)を2回外側に繰り返す。ただし花びらの位置が互い違いになるようにする。

このように「切り込み」「切り取り」「ガイド」で基本的なバラを彫ることができると確認できた。また、「切り取り」には柄を浮き立たせる（(6), (8)など）以外にも、深い溝を彫る（(2), (12)）、彫る前の素材の形を整える（(3), (7), (10)など）といった深さによる意味合いの違いがあることを確認した。中でも(14)のように、厚みが全体で一定でない「切り取り」により複雑な花びらの表情を表現することを確認した。

4. 提案システムの設計

本章では、前章の分析に基づき開発した、タイ・カービングの手順記述に特化したデザイン支援システムの設計仕様について述べる。

4.1 システムコンセプト

本システムは、一般的な2Dドローイングソフトのインターフェイスをとり、「切り込み」「切り取り」「ガイド」を描きながら、以下の3つを統合した記述が行えるモデルを目指した。

- 2D Geometry：素材の正面から見た時の幾何学的プリミティブの種類・位置・向き・大きさを表す。
- Depth：幾何学的プリミティブにroleを設定することで、素材に対する物理的な作用を表す。特に「切り取り」については深さにより意味合いが変わること、深さが一定とは限らないことから、深さの変化をマルチチャネル・パラメータで記述する。
- Step：制作工程の順番をシリアル化することで、単に完成品の形状を表すのではなく、制作工程を記述する。

幾何学的プリミティブの役割（role）は視覚的にも見分けられるよう、「切り込み（KNIFE_LINE）」は実線、「切り取り（KNIFE_EDGE）」は薄い塗りつぶし、「ガイド（GUIDE）」は色付き破線で表示する。これにより、ユーザはドローイングソフトで色や線種を使い分ける感覚で動作の種類を指定することができる。

4.2 マルチチャネル・パラメータ制御

「切り取り」は3.3において、深さにより意味合いが異なり、さらに深さが全体で一定でない場合があると述べた。そこで深さについては、KNIFE_EDGEの塗りの濃さにより表現する。塗りの濃さと面の幅広さにより「削り取る範囲」「刃の侵入深度」が表され、素材表面からの物理的な引き算の量を視覚的に示すことができる。

そのうえで、途中で変化するパラメータを表すため、幾何形状と属性情報を独立させて記録する。マルチチャネル・パラメータ制御を行う。ベジエ曲線の始点から終点の間の位置を $t \in [0, 1]$ とした時、各パラメータの制御点の集合として表す。

Geometry：ベジエ曲線の制御点（ x, y 座標系）。

Depth：切り込みの深さの制御点（ t_i, z_i ）のリスト。

任意の地点 t における深さの値 $D(t)$ を求める計算は、前後の制御点 $P_n(t_n, d_n)$ と $P_{n+1}(t_{n+1}, d_{n+1})$ から以下の線形補間で表す。

$$D(t) = d_n + (d_{n+1} - d_n) \cdot \frac{t - t_n}{t_{n+1} - t_n}$$

この処理をレンダリング時に行い、KNIFE_EDGEの濃淡に反映させる。

この手法は将来的にフリル型におけるストローク中の振幅変化の記述にも応用することができると考えている。

4.3 パス追従型局所座標系の導入

タイ・カービングでは同じ柄が等間隔に並ぶモチーフが多用されることから、効率的に記述するために任意のパス（円、直線、ベジエ曲線等）に対してその法線または接線方向を基準とする「パス追従型局所座標系」を導入した。

個数の指定：局所座標を定義する座標の数を指定すると等間隔に局所座標が生成され、同じ柄が複製される。花モチーフの花びらの枚数を指定できる。

基準角の自動生成：図形を配置する際、基準となる親パス上の法線方向（または接線方向）を局所座標の 0° とする。これにより局所座標系に割り当てられた柄を円に対し放射状に並べたり（図9）、ベジエ曲線に沿って同じ柄を並べたりすることができる。

配置アルゴリズムの適用：3.2.2で述べた逆位相配置や同位相配置は、同心円上に並べた円にそれぞれ局所座標系を配置する際、局所座標系の配置のオフセットとして記述できる。

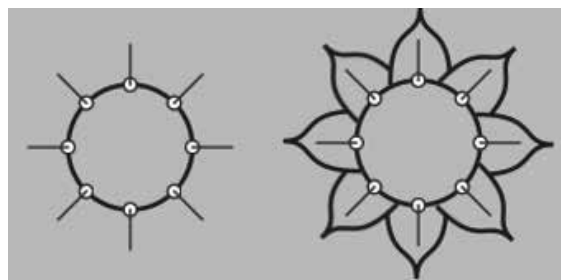


図9 局所座標系による作図

4.4 データモデル：拡張JSON構造

本システムの保存形式には、幾何データ、セマンティクスマッピング、制作プロセス上のメタデータなどを付与した独自のJSON構造を採用した（図10）。主な構成要素は以下のとおりである。

- 図形情報：幾何学的プリミティブ種類と、その形を規定するための情報。楕円なら「長径と短径の長さ」、特化型プリミティブでは「比率パラメータ」をさす。
- セマンティクスマッピング：動作種別（role）、工程番号、KNIFE_EDGEの場合は深さ。
- 制作プロセス上のメタデータ：パス追従型局所座標系の親図形、配置規則フラグ、幾何学的プリミティブのグルーピング情報など。

```

"shapes" : [ {↓
  "kind" : "CUBIC2", ↓
  "id" : "e862cd41", ↓
  "role" : "KNIFE_LINE", ↓
  "stepno" : "1", ↓
  "geometry" : {↓
    "tx" : 590.4, ↓
    "ty" : 503.2, ↓
    "angleDeg" : 0.0, ↓
    "sx" : 1.0, ↓
    "sy" : 1.0 ↓
  }, ↓
  "parameters" : {↓
    "points" : [[0,0],[50,100],[100,0]], ↓
    "profiles" : {↓
      "depth" : [↓
        [{"t" : 0.0, "value" : 0.3}], ↓
        [{"t" : 0.5, "value" : 0.8}], ↓
        [{"t" : 1.0, "value" : 0.3}] ↓
      ], ↓
    }
  }, ↓
}, ↓
], ↓

```

図10 JSON表現（抜粋）

5. プロトタイプの実装と造形検証

提案したモデルを検証するため、デザイン支援システムのプロトタイプを制作した(図12)。

画面中央にキャンバス領域、画面左にツールが配置されており、一般的な2Dドローイングソフトと同様、ツールから幾何学的プリミティブを選択し、キャンバスでマウスをクリックまたはドラッグすることにより図を描くことができる。

画面右には工程をリストとして表示する領域があり、図を描く度にその工程が自動的に追加される。

幾何学的プリミティブを右クリックすることでその図形のroleを変えることができ、roleを変えると表示を切り替えることができる(図11)。

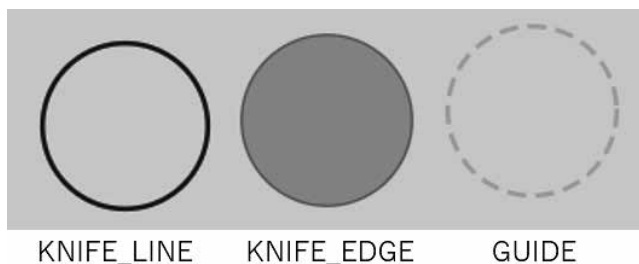


図11 roleによる表示の違い

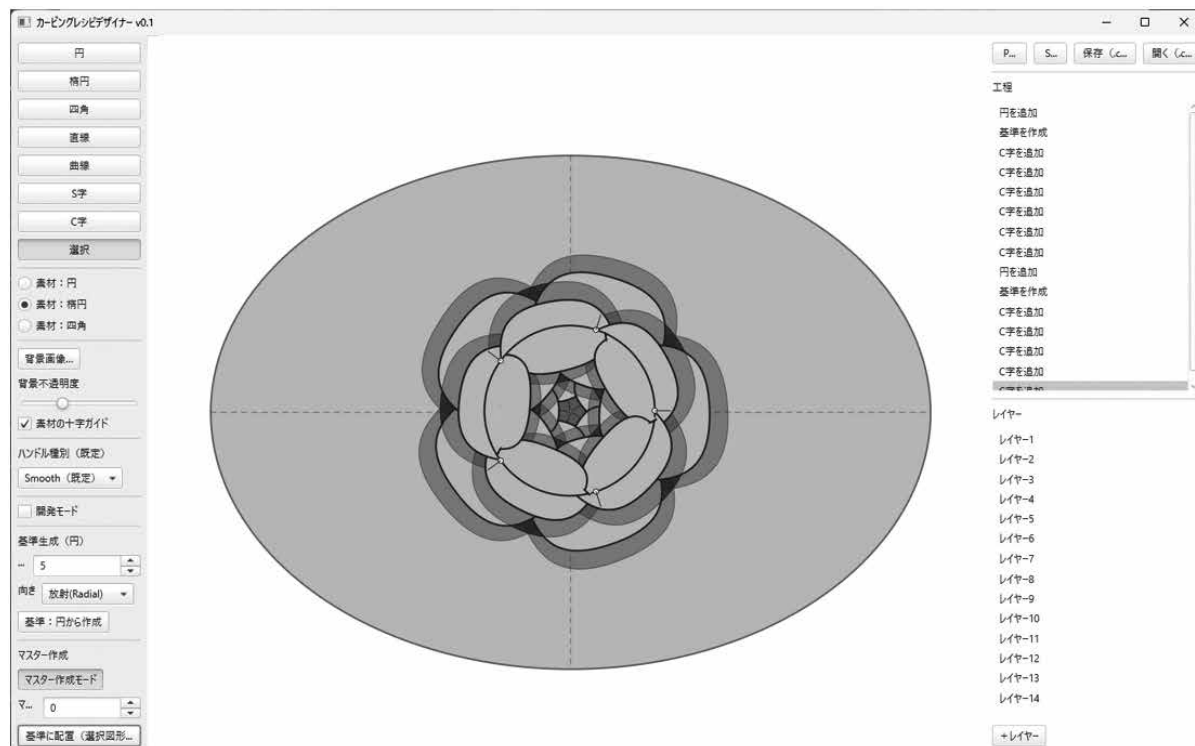


図12 デザイン支援システムのプロトタイプ

6. まとめ

本稿では、タイ・カービングのナイフの動きを「動作プリミティブ」として定義し、2Dドローイングの手法を用いて「深さ」と「手順」を同時に記述可能なデザイン支援システムを提案した。本システムにより、図形の対称性や位相を意識した図案の配置、制作工程をデジタル・レシピとして記述することが可能となった。マルチチャネル・パラメータ制御についてはデータとしての表現方法を提案したもの、GUI上でのデータの追加方法、深さ変化の濃淡表示については未対応であるので、今後追加していきたい。

今回はストローク型に着目して設計・制作を行ったが、マルチチャネル・パラメータ制御の手法はフル型の周期のストローク中の変化を記述する手法としても使えると考えている。また、タイ・

カービングの複雑な文様においてピボット型は重要な役割を持ち、ハート形や蛇行する形状の制作過程で必ず使われる。将来的にはその記述方法も検討する必要がある。

参考文献

- [1] 森田美穂：香りの花&スイーツ 新版ソーブ・カービング，日本文芸社（2009）
- [2] 森田美穂：暮らしを彩る ソープカービング，日本文芸社（2012）
- [3] 山田梨絵：四季と行事を楽しむ ソープカービングの教科書，誠文堂新光社（2015）
- [4] 片山美耶，智美，森田美穂：いちばんよくわかるソーブカービング LESSON，河出書房（2017）
- [5] 智美：美しい世界の文様を彫る ソープカービング，メイツ出版（2019）
- [6] 文化庁「文化遺産オンライン」（最終閲覧：2026年3月1日）
<https://online.bunka.go.jp/>
- [7] 八村広三郎：伝統舞踊のデジタル化，映像情報メディア学会誌 Vol.61, No.11, pp.1557-1561（2007）
- [8] 大日本印刷「鳥取県の重要無形民俗文化財「麒麟獅子舞」のモーションキャプチャを活用した伝統芸能の継承」（最終閲覧：2025年3月1日）
https://www.dnp.co.jp/biz/case/detail/20173157_4968.html
- [9] 堀内芳明，出羽重遠：デジタルファブリケーションによる伝統工芸品の製造手法の提案（第2報），令和元年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告，pp.1-3（2020）
- [10] 志鎌一江，出羽重遠：デジタル製造技術を活用した県内伝統民芸品の製造工程の確立－会津だるまの復活 令和2年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告，pp.1-3（2021）