

道具型デバイスを活用した複合現実型電子彫刻システム

川越真帆^{*1} 山本拓也^{*1} 大槻麻衣^{*2} 柴田史久^{*1} 木村朝子^{*1}

A Mixed Reality Based Virtual Carving System Using ToolDevice

Maho Kawagoe^{*1}, Takuya Yamamoto^{*1}, Mai Otsuki^{*2}

Fumihisa Shibata^{*1}, and Asako Kimura^{*1}

Abstract - Thanks to the rapid progress of 3D printers, we can easily print 3D objects that we made ourselves. However, it is still difficult to freely engrave marks on the 3D virtual object's surface in a similar way to the real carvings. In this study, we propose a virtual carving system in a Mixed Reality (MR) space which the users can engrave marks on 3D virtual object's surface. In our system, by touching and tracing CarvingToolDevice on the real object, users can carve on the 3D virtual object's surface which is superimposed on the real object. This paper describes the design and implementation of the proposed system and describes the findings through the user's experience.

Keywords : Carving System, mixed reality, ToolDevice

1. はじめに

彫刻とは、木・石・金属などに文字や絵、模様を彫り込むこと、またその作品のことである。中でも木材を用いた彫刻は素材が安価で手に入れやすく、また加工しやすいといった点から、小学校や中学校での図工や美術教育にも取り入れられ、日本人にとって身近な工芸となっている。木材を用いた彫刻には、ノミなどを使用し木材から形を削りだし、立体物を生成するものや、レリーフのように平面に対して彫刻刀を用いて模様を彫るものなどがある。

彫刻は1つの木片から様々な形を彫ることができる一方、間違えてしまった際に彫り直しができないことや、彫刻刀の刃で怪我をしてしまう恐れがあるといったデメリットもある。これに対して、彫刻作業を電子化する仮想彫刻システムに関する研究が行われてきた[1-5]。

これらの研究では、マウスやキーボード、あるいはペンタブレットを使用し、画面上をなぞることで、安全かつ容易に彫刻作品を作成することができ、完成度の高い作品を作成することが可能である。しかし、彫刻ならではの木を削る動作や削ったときの触感などを得ることはできていない。

伝統工芸には、作品そのものだけでなく、作業工程を

楽しむことにもその価値があり、それによって作品にユニークさが生まれると言われている[6]。彫刻においても、彫刻作業時の操作方法や操作感(動作、触感など)といった要素を仮想彫刻に導入することで、より良いシステムの実現が期待できる。また、電子的なシステムを利用して実際の作品制作を疑似的に体験できれば、今後、技術の伝承や教育といった場面でも応用できる可能性がある。

そこで、我々はその第一歩として、現実世界と同様の操作で仮想彫刻を行うことができる複合現実(Mixed Reality; MR)型電子彫刻システム(図1)を開発する。まずはレリーフのような平面に対する彫刻を想定し、彫刻刀の形状や操作方法を取り入れた彫刻刀型デバイスおよび、板のモデルデータ(CG)の表面に対して、木彫りで施されたような凹凸を付与するシステムを目指す。ユーザはデバイスの傾きや押しつけ量を変化させることによって、実世界の彫刻と同様の作業工程で、彫り跡の太さや長さを変化させることを可能にする。

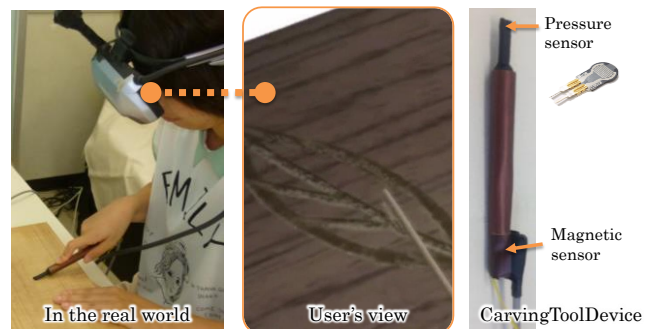


図1 提案システムを用いた複合現実空間での電子彫刻制作(イメージ)

Fig. 1: An image of virtual carving using proposed system.

*1: 立命館大学 情報理工学研究科

*2: 筑波大学

*1: Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

*2: University of Tsukuba

本研究では、前述のように、実際の彫刻作業における操作方法や操作感を模倣した MR システムを構築し、その操作感とユーザの行動が実際の彫刻作業にどの程度近づいたものになるかを検証する。

本稿では、2章で関連研究について述べ、3章では実世界における彫刻刀を用いた彫刻動作と彫り跡の関係の分析、およびその結果をもとにモデル化した彫り跡の表現方法について述べる。4章では、彫刻刀型デバイスおよび電子彫刻システムの開発について述べ、5章では、電子彫刻システムを運用した結果得られた知見について述べる。6章では、実世界の彫刻作業と提案システムとの比較した結果について述べる。

2. 関連研究

仮想彫刻における凹凸の表現方法に関する研究として、脇田ら[1]はリアルタイムで法線マップを生成し、レンダリングを行うことのできるシステムを開発している。同研究では、2D 画面に表示された 3D オブジェクトの表面を削る際に、法線マップを作成し疑似的な凹凸を表現している。また、Mizuno[2]・[3]は仮想の彫刻刀を操作し、その任意の形状を 3D モデルから取り除くという物理モデルに基づいた彫刻表現方法を提案している。同システムでは、2D ディスプレイに表示された 3D モデルの表面をマウスでドラッグすることで、彫刻を行う。これらの研究では、リアリティの高い、彫刻らしい凹凸表現が実現されているが、入力方法の自然さ・操作方法の模倣にはあまり重点が置かれていない。また、この種の「間接操作」を好まず、現実の造形作業や描画作業のように、対象となる物体に対してデバイスを直接押し当てるといった直接的／直観的な操作を求める人も少なくない。

そこで、これらのシステムの拡張として筆圧感知式のペンタブレットを用い、彫りの深さや角度をペンの圧力によって変更するシステムも提案されている[4]。マウスと比べると、ディスプレイに表示された 3D モデルへの直接入力が可能であるが、ペンが滑りすぎる点や彫刻時の音がないなど、実際の彫刻との違いが彫刻としての操作感を損ねるといった問題が残る[5]。

一方、実世界の道具の要素や作業手順をシステムに組み込むことで、直接的／直観的な造形操作を可能にしようとする研究もある。Mueller ら[7]はレーザーカッターにレーザーポインタを導入し、素材に直接、スケッチするように線を引くことで、複雑なジョイントや歯車をインタラクティブに切り出すことが可能なシステムを提案した。Follmer ら[8]は、子供たちが直観的にモデリングを行うことができる電子粘土インタフェース KidCAD を開発した。このシステムでは、変形可能なゲル状の入力デバイスに対し、実物体を物理的に押し付けることで 2.5D の形状を生成することができる。Sheng ら[9]は、スポンジで作成されたデバイスを介して、実世界での粘土細工のように、ディスプレイに表示された 3D モデル

を直観的に変形させることが可能なシステムを開発した。Zoran ら[6]は、実際の彫像作業とモデリングを組み合わせたシステムとして FreeD を開発した。このシステムでは、あらかじめ設計された 3D モデルに基づいてデバイスの動きを制御し、ユーザの彫刻作業の補助を行う。

これらの研究では、現実世界での物理的な造形作業を模倣することで、造形作業を行う際の手指の感覚や、実際に触れる感覚を再現することを重視しており、これにより制作者の創造性を損なうことなく、表現豊かな出力が得られることを示唆している。しかし、同様のアプローチで物体表面に対して仮想彫刻を行う研究は見られない。

直接的／直観的な造形操作を実現するために造形作業に MR 技術を導入するアプローチもある。Arisandi ら[10]は、3DCG のモデリング作業を、実世界の木材加工作業に近づけることで、学習が容易で、直観的なモデリングシステムを提案している。彼らのシステムでは、実世界の造形作業で用いられるナイフやハンマーなど、実際の道具に近い形状、重さ、触感、操作音などを有する道具型デバイスを各種利用することで、実際の作業に近づけている。さらに、作業空間を MR 空間とすることで、操作する場所と視認する場所を一致させ、実世界と同様に手元を見ながらの操作を実現した。しかし、このシステムは木材の組み立て作業を模倣しており、本研究で想定する、表面に細かな凹凸を付けるといった作業には対応していない。

また、久田ら[11]は、物体表面の形状を疑似的に変形することで、実物体がもつ実在感やボリューム感も表現可能なシステム「HYPERREAL」を開発している。HYPERREAL は、実物体に映像を投影することで、まるで実物体そのものが変形しているかのような表現を可能にしており、実物体に直接入力デバイスを押し当てることで、物体の表面形状をインタラクティブに変形することができる。このシステムの拡張として、山本ら[12]は、実世界で道具を使う際の握り方に着目し、握り方によって複数の道具を切り替えることが可能な道具握り判別型インタフェースを開発した。このインタフェースを HYPERREAL と併用することで、ユーザは対象物体から視点を動かすことなく造形作業に集中することができる。しかし同システムでは、入力デバイスの角度や力のかかり具合によって彫りの深さが変わるといった、彫刻らしい操作は実現されていない。

そこで本研究では、実際の彫刻作業における操作方法や操作感の模倣を目的とし、(1) ユーザの操作によって彫りの深さや幅など彫り跡の形状をリアルタイムに変更可能、(2) 実物体表面に直接入力デバイスを押しつける直接的／直観的な造形操作が可能、という 2 つの要件を満たす MR 型電子彫刻システムを開発する。

3. 設計

3.1 実世界での彫刻作業の分析

前述の要件を満たすMR型電子彫刻システムを設計するために、実際に彫刻刀を用いて木材を削った際の彫り跡の傾向を分析し、彫り跡に影響を及ぼすインタラクション要素について分析を行った。

3.1.1 彫刻刀の種類

まず彫り跡に影響を及ぼす要素として挙げられるのは、彫刻刀の種類である。一般に使用される彫刻刀は、大きく印刀、丸刀、三角刀、平刀の4種類に分けることができ(図2)、これらは種類によって刃の形状が異なり、使用用途も異なる。例えば、下絵に沿って輪郭を削ったり細かな作業を行ったりする際には印刀を、広い範囲や柔らかな線を彫る際には丸刀、鋭い溝を彫る際には三角刀、木の表面を平らに削ったり他の彫刻刀で削った際にできた溝を滑らかにしたりする際には平刀を用いる。

3.1.2 彫刻刀を入刀する角度

次なる要素に、彫刻刀を入刀する角度が挙げられる(図3)。実際に木材を削り、彫刻刀を入刀する角度を変えることで彫り跡がどのように変化するか確認すると、以下のような傾向が見られた。

彫り跡の深さに関しては、入刀する角度が小さいと力が彫刻面と水平な方向に分散するため、彫り跡が浅くなる傾向が見られた。一方、角度が大きいと彫刻面に対して垂直な方向に力が集中し、彫りは深くなる。

また、ほとんどの彫刻刀(特に丸刀と三角刀)は刃の下部(最初に木材に接する部分)は細く、刃の上部ほど幅が広がっている。よって、入刀する角度が大きくと彫りが深くなるほど、彫り跡の横幅も広がる。

彫り跡の縦幅に関しても同様に、入刀する角度が大きいくほど短く、角度が小さいほど長くなる傾向が確認された。これは、角度が大きいくほど深く、角度が小さいほど浅く刀が刺さるため、それが彫り終わるまでの距離(縦幅)に影響したと考えられる。

ただし、印刀は彫刻対象に切り込みを入れるように使用するため、角度・押しつけ量に関係なく縦幅、横幅に変化はなく、深さは角度・押しつけ量と比例関係となる。

3.1.3 彫刻刀の押しつけ量

3つ目の要素として、彫刻作業時の彫刻刀の押しつけ量が挙げられる(図3)。実際に彫刻作業時の彫刻刀の押しつけ量を変えることで彫り跡がどのように変化するか確認すると、以下のような傾向が見られた。

三角刀、丸刀において、横幅は彫刻刀の押しつけ量が大きいくほど広くなり、縦幅は角度に比例する傾向が見られた。これは、前述したように、押しつけ量が大きいくほど彫刻刀の刃が物体に深く刺さるためである。

一方、平刀では角度・押しつけ量に関係なく横幅は一定であり、縦幅は角度に比例する。

実際の彫刻では、これら3要素を適宜変えて彫ることで図4のような複雑な彫り跡を作成することができる。

3.2 彫り跡表現モデル

ここでは、彫刻刀デバイスの「種類」「彫刻刀を入刀する角度」「押しつけ量」から、彫り跡の基本形状の「縦幅」「横幅」、および「彫りの深さ」を決定するモデル(「彫り跡表現モデル」と呼称する)を設計する。

本研究では、実際の彫刻刀による彫刻の画像をもとに、三角刀(図5(a))、丸刀(図5(b))、平刀、印刀の彫り跡の基本形状を定め、これを彫刻刀デバイスの押しつけ量や彫刻面とのなす角度に応じて変形させ、デバイスの刃先と彫刻対象が接した位置に並べることで彫り跡を表現する方法をとる(図6)。

前節の彫刻作業の分析結果から、以下のことがわかった。

- (1) 彫刻刀の種類によって彫り跡の深さ・横幅・縦幅が異なる

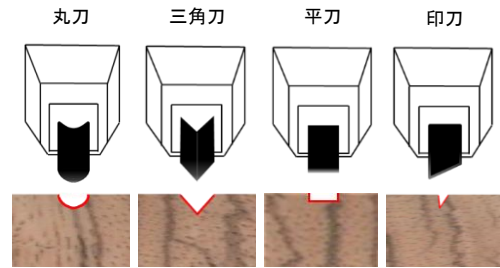


図2 各彫刻刀の彫り跡

Fig. 2: Actual carving tools and their carving strokes.

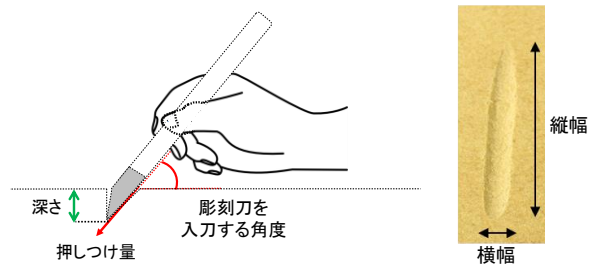


図3 彫刻動作のパラメータ

Fig. 3: Parameters of virtual carving.

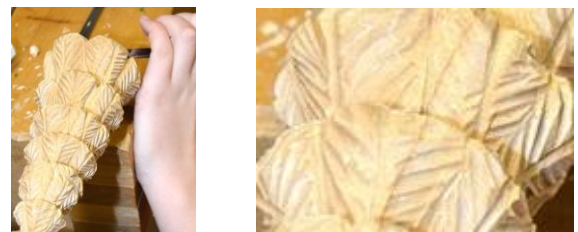


図4 彫刻の表面例

Fig. 4: Surface example of sculpture.



図5 彫り跡の基本形状

Fig. 5: The basic shape of carving stroke in our system.

- (2) 彫り跡の深さは「彫刻刀の入刀角度」「押しつけ量」によっても変化する
- (3) 彫り跡の縦幅は「彫刻刀の種類」「彫刻刀の入刀角度」によっても変化する
- (4) 彫り跡の横幅は「彫刻刀の種類」「彫刻刀の入刀角度」「彫刻刀の押しつけ量」によって変化する

これらの結果から、彫り跡表現モデルは以下の性質を有する必要がある。

- (a) 彫刻刀を彫刻面に押し付ける力を P とすると、 P が大きいとき、彫りの深さは深くなる。
- (b) 彫刻刀と実物体のなす角度を θ (彫刻刀が仮想物体の表面と平行な時 $\theta = 0$, 垂直な時 $\theta = \pi/2$) とすると、 θ が大きいとき、縦幅は小さくなり、彫りの深さが深くなる。
- (c) 基本形状からの横幅は、深さに比例する。

これらの性質を満たすモデルとして、以下の式で基本形状の深さ d , 縦幅 h , 横幅の拡大率 w を定義した (図7)。

$$d = m \cdot d_{\max} \cdot \frac{P}{P_{\max}} \cdot \sin\theta \quad (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}) \quad (1)$$

$$h = m \cdot h_{\max} \cdot \cos\theta \quad (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

$$w = w_{\max} \cdot d \quad (3)$$

ここで、 P_{\max} は彫刻刀の先端にかかる最大の圧力、 θ は彫刻刀の傾き、 d_{\max} は $\theta = \pi/2$ において P_{\max} を加えた時の彫りの深さの最大値 (彫刻刀ごとに設定)、 m は操作

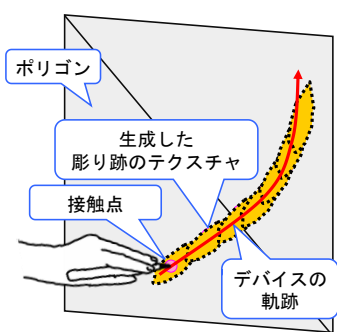


図6 彫り跡の生成方法
Fig. 6: Expression of carving lines.

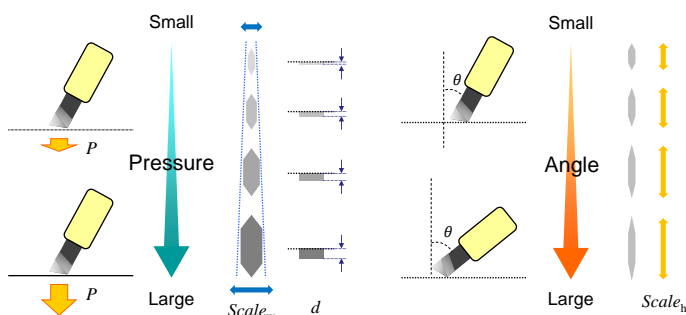


図7 彫り跡表現モデル
Fig. 7: Carving model in proposed system.

対象の材質に関する係数 (ヒノキの硬さを1としたときの硬さ比率), h_{\max} は $\theta = 0$ における縦幅の最大値 (一般的な彫刻刀を用いた場合の彫り跡の縦幅の最大値とした), w_{\max} は彫刻刀ごとに定めた彫りの深さと横幅の比例関係を表す定数 (一般的な彫刻刀を用いて計測) である。

実際に彫刻作業を行う際には、彫りの深さに関わる m と縦幅に関わる m は厳密には異なった値となるが、本研究では単純化のため、 m は一定とした。

ただし、平刀に関しては、横幅は変化しないため、式(1), (2)のみを用いて変形させ、印刀に関しては、深さのみ変形するため式(1)のみ適応する。

4. 実装

4.1 彫刻刀デバイスによる彫り跡の生成

4.1.1 彫り跡のCG表現

1章でも述べたように、彫り跡のCG表現には様々な手法が提案されている。しかし、本研究ではMR空間で実際の彫刻作業における操作方法や操作感を模倣した電子彫刻を目指すため、実時間処理と木彫りらしい彫り跡表現を両立する、処理負荷の少ない表現法が必要となる。そこで、我々は彫り跡をテクスチャとして表現し、彫りの深さなどによってテクスチャを変化させることで負荷を軽減することにした。なお、今回は処理負荷軽減のため簡易的にテクスチャを用いる方法を採用したが、計算機の性能が向上すれば、既存研究のように法線マップや物理モデルを使用した手法を適用し、よりリアルな彫り跡を再現することも可能になると考えられる。

3.2で述べた通り、本研究ではユーザが彫刻刀デバイスを彫刻対象に押し付けた軌跡に沿って、彫り跡のテクスチャを連続的に並べることで彫り跡のストロークを生成する。ここでは、この彫りの深さの表現、彫刻刀の刃の向きと彫り跡の実現方法について述べる。

4.1.2 彫りの深さの表現

実際の彫り跡では彫りが深くなるにつれて彫り跡にできる影が濃くなり、彫り跡の明暗の差が大きくなる。このことから、彫りの深さを、彫り跡の輝度を変更することで表現することにした (図8)。

彫り跡の輝度値の基準を決定するために、実世界で彫刻作業を行い、彫りが浅い (彫り跡の明暗の差が小さい) 場合と彫りが深い (彫り跡の明暗の差が大きい) 場合の彫り跡の画像を取得した。彫りが浅い場合での輝度値を最小の輝度値 V_{\min} とし、彫りが深い場合での輝度値を最大の輝度値 V_{\max} とする。この最小と最大の輝度値と、前節で求めた彫りの深さ d を用いることで、彫り跡のテクスチャの輝度値 C を次式で算出する。

$$C = d \cdot V_{\max} + (1-d) \cdot V_{\min} \quad (4)$$

また、彫り跡が重なった場合は、重なった部分に深さを加算する。

深さの数値データはバックグラウンドで保存しており、3Dプリンタのデータ形式に変換することで、実物として出力することができる。

4.1.3 彫刻刀の刃の向きと彫り跡

実世界での彫刻作業は、彫刻刀の刃が向いている方向にのみ行うことができ、刃が向いていない方向には彫刻を行うことができない。一方、仮想世界の彫刻作業は、必ずしもこの制約に囚われない。しかし、実際に刃先の向きに依らず彫刻可能にしたところ、体験者から「実際の彫刻作業とかけ離れているため、違和感がある」といったコメントが得られた。そこで、実世界同様、刃先の向きにのみ彫刻可能とした。具体的には図9に示すように、デバイスの刃の向きを示すベクトルと、デバイスの移動方向を示すベクトルの内積を取り、閾値以下の場合に彫刻可能とした。

4.2 システム構成

MR型電子彫刻システムのシステム構成を図10に示す。MR空間の映像提示には、両眼立体視が可能なビデオシースルー型HMDであるCanon社製MREAL HM-A1を用いた。また、体験者の頭部位置とデバイスの位置姿勢推定には磁気ベースの3次元位置姿勢測定装置であるPolhemus社製FASTRAKを用いる。トランスミッタを任意の位置に固定し、HMD、デバイス、実物体に取り付けられたレーザーで、トランスミッタとレーザー間の相対的な位置姿勢を連続的に取得している。

さらに、MR空間を観察する際、単純に仮想物体を重畳描画すると、仮想物体が実物体よりも常に手前に描画されるオクルージョン問題が発生する、この問題に対し、HMDからのキャプチャ画像に対して、手の色をキーカラーにして手領域を抽出し、マスキングを行うことで、CG映像が手領域に描画されないように処理する。

MR空間の生成のためには、まずPC上でOpenGLを用いた仮想空間の構築・レンダリングを行う必要がある。本システムにおけるMR空間の提示には両眼立体視可能なHMDを用いるため、左右の視差を考慮した2つの視点からのレンダリング画像をそれぞれ生成する。レンダリング時のカメラ位置姿勢には、FASTRAKから得られた値を用いることで、HMDの位置姿勢に合わせたレンダリング画像をリアルタイムに生成する。HMDカメラから取得した映像をOpenGL背景に配置した四角ポリゴンにテクスチャマッピングすることで、リアルタイム映像へのCGの重畳描画を実現している。

本システムでは、描画対象となる実物体（木材）と同形状の3Dモデルを実物体と重なるようMR空間中に配置する。使用する実物体の背面には磁気センサのレーザーが取り付けられており、実物体の位置姿勢情報を取得している。そして、彫刻刀型デバイスによる入力をもとに計算された彫り跡を、その3Dモデル上にテクスチャマッピングし、実物体に重畳描画することで、仮想的な彫刻を実現する。

4.3 彫刻刀型デバイス

試作した彫刻刀型デバイスを図11に示す。3章で述べたように彫り跡を変形するため、作業時の押しつけ量、位置姿勢を取得する必要がある。そこで、デバイスを実物体に押しつけた際の力を数値として取得するため、力の強弱によって抵抗値が変化する圧力センサ（Interlink Electronics Inc. 製、FSR400 SHORT）をデバイスの先端に取り付ける。圧力センサは物体に押しつける力によって抵抗値が変化するため、その抵抗値の変化量から荷重を取得することができる。この圧力センサは0.2~20.0 Nまでの力を感知することができる。圧力センサで取得した値は、Arduino Uno（Arduino LLC 製）を通してMR空間管理用PCへ送信される。また、MR空間内でのデバイスの位置姿勢推定を行うため、磁気センサのレーザーをデバイスの後端に搭載している。

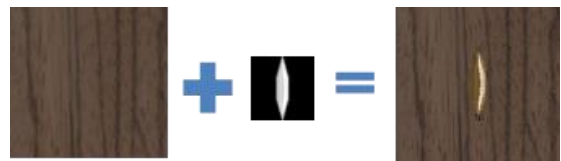


図8 深さの表現
Fig. 8: Expression of depth.

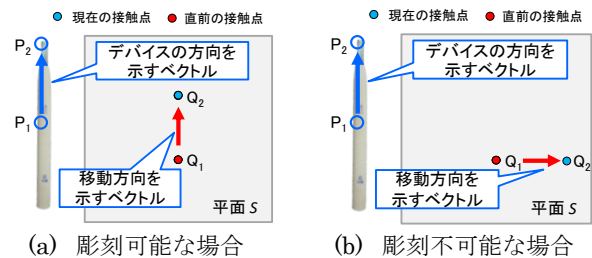


図9 彫刻可能かどうかの判定

Fig. 9: Judging whether carving is possible.

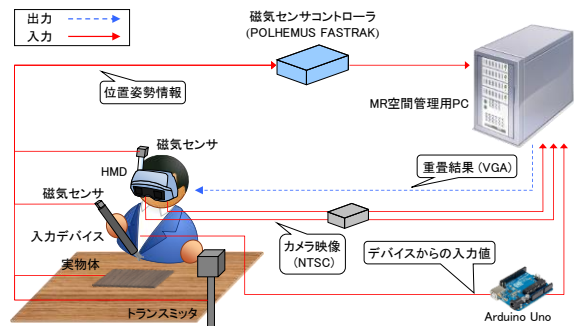


図10 システム構成

Fig. 10: System configuration.



図11 彫刻刀型デバイス

Fig. 11: Prototype of CarvingToolDevice.

実際の彫刻作業時には、彫刻刀が木材に刺さる反力、削る際の振動を触感として感じる。この触感は彫刻時の重要な手がかりの一つである。そこで、デバイス先端に紙やすりを取り付けることで、彫刻作業時に、彫刻刀の刃が実物体に接触した際に生じる抵抗感を簡易的に表現している。

4.4 彫刻結果と作品例

試作したMR型電子彫刻システムによる彫り跡の例を図12~16に示す。図12は押しつけ量を変えて彫刻した結果であり、図13~図16は刃先の種類を変えて彫刻した結果である。用途や付けたい彫り跡によって、刃先の種類やデバイスの押しつけ量・角度をリアルタイムに変



(a) 提案システム (b) 実物

図12 押しつけ量による彫り跡の変化
(右にいくにつれて押しつけ量が増加)

Fig. 12: Changes in stroke with pressure.



(a) 提案システム

(b) 実物

図13 三角刀の彫り跡

Fig. 13: Stroke of V-chisel.

(a) 提案システム

(b) 実物

図14 丸刀の彫り跡

Fig. 14: Stroke of gouge.



(a) 提案システム

(b) 実物

図15 平刀の彫り跡

Fig. 15: Stroke of straight chisel.

(a) 提案システム

(b) 実物

図16 印刀の彫り跡

Fig. 16: Stroke of skew chisel.



図17 作品例

Fig. 17: Carving examples in proposed system.

更しながら操作を繰り返すことで、物体表面に図17に示すような太さや形状の異なる線を直観的に彫刻することができる。

5. 体験と考察

5.1 体験の目的

ここでは、液晶タブレットと提案システムを用いた電子彫刻操作と実際の彫刻を体験・比較させた(図18)。

この体験を通して分析する内容は、

- (1) 提案システムで彫刻の方法が模倣できているのか
- (2) 彫刻作業を模倣することが操作感やユーザの満足度に影響を及ぼすか

の2点である。なお、ここでいうユーザの満足度とは、「作業時の楽しさ」「彫刻をしている感覚があるか」を指している。

液晶タブレットを用いたシステムを採用したのは、先行研究で実現されたシステムの中でもっとも彫刻に近い結果が得られており、ペン入力ではあるものの比較的直観的に入力できると考えたからである。

5.2 体験条件

体験者には、図19に示す太さ、長さ、角度の異なる直線を彫刻させ、現実の彫刻作業を基準に、提案システムと液晶タブレットを用いた電子彫刻操作を評価させた。

実際の彫刻作業同様、CGを重畳描画した板や液晶タブレットは自由に回転させてよいものとし、デバイスの持ち方等も指定しなかった。また、提案システムにおいて、4.1.3に記載した彫刻刀の刃の向きによる制限があることは体験者には説明しなかった。

液晶タブレットを用いたシステムには、感圧式タブレット(Wacom社製液晶ペンタブレット Cintiq 13HD)を用いた。提案システムと液晶タブレットを用いたシステムの違いは、

- ・前者は彫刻対象の表示を実物の木材に重畳描画しているのに対して、後者は液晶タブレット上に表示



(a) 液晶タブレット

(b) 提案システム

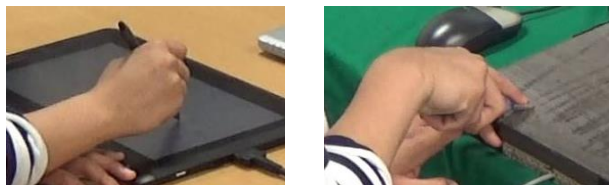
図18 各システムの体験条件

Fig. 18: Experience condition in each system.



図19 体験で彫らせた内容

Fig. 19: Images presented in the experience.



(a) 液晶タブレット (b) 提案システム

図 20 デバイスの持ち方の違い

Fig. 20: The difference how to hold the device.

・前者は彫刻刀デバイスで入力，後者はタブレット用のペンで入力

の 2 点で，彫り跡を生成するアルゴリズムは同じとした。

体験者は 12 名（20 代の男性 9 名，女性 3 名）で，全員が実際に彫刻刀を用いた彫刻経験があり，両システムの初心者である。また，体験時に用いた彫刻刀は両システムとも丸刀のみであった。体験時間はそれぞれの彫り跡ごとに 15 秒ほどで，操作に慣れるのに時間がかかった人で 2 分ほどだった。そして，体験後にアンケートとコメントを聴取した。アンケート項目には，Hassenzahl ら [13] が提案した AttrakDiff を用いた。このアンケートはユーザーエクスペリエンスを定量的に評価するもので，合計 28 個の質問が用意されており，各質問は対となる形容詞（単純・複雑，退屈・魅力的など）で構成され，質問ごとに 7 段階で回答する。体験時の様子はビデオで録画し，現実の彫刻操作を模倣した提案システムとそうでない液晶タブレットを用いたシステムでユーザの行動にどのような違いが見られるかをユーザのコメントと合わせて分析した。

5.3 体験の流れ

体験の流れは以下の通りである。

- (1) 体験者に本物の彫刻作業を体験させる
- (2) 液晶タブレットを用いるシステムと提案システムの内，片方をランダムに選択する
- (3) 図 19（左）に示す太さの異なる線を彫刻させる
- (4) 図 19（右）に示す向き of 異なる線を彫刻させる
- (5) アンケートに回答させる
- (6) もう一方のシステムについても，(3)～(5) を行う
- (7) 両システム体験後，コメントを聴取する

5.4 結果・考察

5.4.1 システムの操作方法の違いについて

【彫刻対象に対する動作】

提案システムでは全員が板に手を添えながら彫刻を行っていたが，液晶タブレットを用いた場合では，12 人中 8 人が手を添えることなく，片手のみで作業を行っていた。また，提案システムでは，横線を彫刻する際には 12 人全員が板を回転させながら，デバイスを前に動かしながら彫刻を行っており，彫刻では行わない動作（デバイスを引く，横に動かすなど）を行ったのは 1 人だけであった。一方，液晶タブレットを用いた場合では，タブレットを回しながら操作したのは 1 人のみであり，横線

を彫刻する際にはペンを横に滑らせて描くように操作する人がほとんどであった。このように，提案システムでは，実際の彫刻作業同様，彫刻対象となる物体を押さえたり動かしたりといった彫刻らしい行動をとることが確認された。

【デバイスに対する動作】

デバイスの見た目の違い（液晶タブレット：ペン，提案システム：彫刻刀）から，ユーザのデバイスの持ち方には図 20 に示すような違いが確認された。ペンを持つ際にはあまり寝かさず立てて使用し，彫刻刀型デバイスを持つ際には，やや寝かした状態で把持する人がほとんど（12 人中 10 人）であった。これは，ペンというデバイスを操作する際に角度を考慮する機会があまりないことや液晶タブレットのペンの仕様として，圧力センサがペン先に取り付けられていることから寝かせて使用すると圧力が正確に取得できないことが要因と考えられる。しかし，液晶タブレットを用いた際，ペンを持つ持ち方であるのにも関わらず，12 人中 11 人が彫刻作業のようにペンを前に押し出して使用した。これは，彫刻という作業内容からデバイスを前に押し使うものだという先入観があったためではないかと考えられる。ペンで直線を引くように，彫刻する際に上から下に引いた人は 1 人のみであった。この時，ペンを押し出しながら操作することに不慣れなためか，押し出す方法で彫っている人ほど直線をきれいに彫ることが出来なかった。また，慣れない操作であることから，操作に慣れるまで時間がかかっていた。

5.4.2 操作に与える影響

【深さ・幅の変更について】

液晶タブレットを使った場合，画面とペンとのひっかかり（抵抗感）がほとんどないことで「スムーズに彫ることができた」といった肯定的な意見も見られたが，普段ペンを使用する際に，圧力を考慮しながら描くことが少ないことから，「どの程度力を加えればどれ位の太さに彫れるのか分からない（12 人中 4 人）」といった声も聞かれた。

一方，提案システムでは，「実際の彫刻と同じ感覚で彫ることが出来た」「圧力で深さを変化させる手法が自然だった」といったコメントが得られた。提案システムでは，実際の彫刻と同様の操作方法で彫り跡が変形することに加え，デバイス先端に紙やすりが付いていることで，彫刻対象への圧力に応じた抵抗感をデバイスから感じ取ることができ，その触感からも彫りの深さ・幅を調節できたのではないかと考えられる。そこで，触感による影響なのかを確認するため，提案システムにおいて触覚フィードバックがある場合とない場合を 8 名に体験させ，その違いをコメントさせた。触覚フィードバックとは，彫刻刀先端に付与した紙やすりが木材に接触した際に生じる抵抗感およびやすりと木材がこすれあう際に発生する振動のことを指す。その結果，4 名の体験者から「触

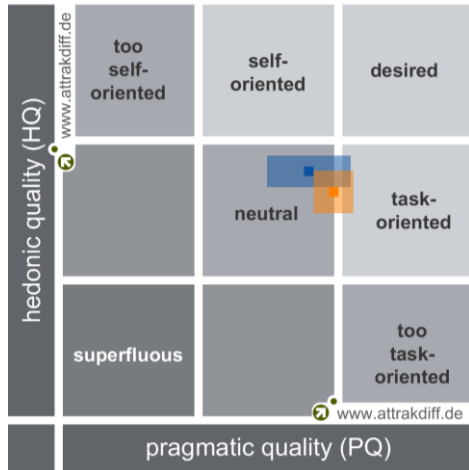


図 21 アンケート結果
(青：提案システム，オレンジ：液晶タブレット)
Fig. 21: Portfolio of results.

覚フィードバック有の方が、反力が強くなり、深さの調節がしやすかった」というコメントが得られた。このことから、紙やすりの付与により得られる触感によって、彫りの深さの調節が容易になる可能性が示唆された。一方、それ以外の体験者は、3名が「紙やすりの有無で彫りやすさ、深さの調節に差はなかった」、1名が「紙やすり無の方が彫りやすく、深さの調節は紙やすりの有無で差はなかった」とコメントした。

また、液晶タブレットにオーバーレイシートを張り付けることで液晶表面の摩擦係数を調節する方法も考えられるが、ペン操作を前提に設計されているため、得られる摩擦は紙へ描く感触に近く、彫刻作業時に感じられるような強い摩擦力が発生するわけではない。試みに液晶タブレットにシートを付与した場合と本システムを4名の体験者に体験させたところ、液晶タブレットに粗めのシートを張り付けたものでも、全員が「紙のような材質に書いている感触だった」とコメントした。このことから、现阶段ではこのようなオーバーレイシートを用いても、彫刻を行っているような感覚を得ることは難しいといえる。

5.4.3 ユーザ満足度に与える影響

体験後、体験者からは、「液晶タブレットの方が普段使い慣れたデバイスであるペンで操作できるため、作業が容易であった(12人中5人)」といった意見が得られた。一方で、「提案システムのほうが、彫刻時に反力がある分、本物の彫刻のように感じた(12人中5人)」、「提案システムの方が反力を得られるため、彫刻らしく楽しかった(12人中3人)」といった意見が得られた。

このことから、提案システムにおいて「彫刻らしさ」を表現できていること、また、単に彫刻結果が得られるだけでなく、操作に彫刻らしさを取り入れることでユーザの満足度の向上を確認した。しかし、提案システムでは彫刻らしい作業時の負荷(彫刻対象からの反力や摩擦力が加わるため、彫刻時に力が必要)が加わるため、実際の彫



(a) 実際の彫刻 (b) 提案システム

図 22 彫刻結果
Fig. 22: Carving results.

刻ほどではないが、液晶タブレットと比べると作業の容易さが減少することも確認した。

5.4.4 アンケート結果

今回実施したアンケート調査から導き出されたシステムの傾向を図 21 に示す。横軸は実用的・使いやすさを表しており、縦軸は感性的・満足できるものであったかを表している。右上に近いほどユーザの満足度が高いことを示している。また、それぞれの領域の中心に位置している四角が平均値を示しており、周囲の四角が分散を表している。この分散値が低い(四角の大きさが狭い)ほど、信頼性が高いことを示している。それぞれ有意な差は確認できなかったが、多くのコメントにあったように、提案システムの方が液晶タブレットよりも感性面・満足度で上回る傾向が見て取れる。これは、提案システムが実際の彫刻作業や触感を模倣できていたからではないかと考えられる。また、実用的には液晶タブレットの方が上回っているが、これは液晶タブレットがすでに商品化されたものであり、コメントにあったように書きやすさ・使いやすさが広く周知されていることも要因ではないかと推測される。

6. 議論

実世界の彫刻と提案システムの操作感を比較するため、同様の模様を彫刻し(図 22)、違いを考察した。

6.1 提案システムの改善点

彫り跡の変化に関しては、深さ・幅を圧力で変化させる変形は自然で分かりやすかったといった意見が多かった。一方、提案システムで思ったよりも圧力を加える必要があったという意見も得られた。これについては、式(1)の変数 m を調整することで、彫り跡を付けるのに必要な圧力を変更することができる。これにより、作業時にユーザの好みに合わせて、例えば弱い力で深く彫るように設定することも可能である。

触感表現については、実際の彫刻では彫りが深くなるほど反力も大きくなり、その反力の大きさからも深さを知覚することができる。提案システムではこの反力を紙やすりで簡易的に実現しているため、細かな深さの違いまでは分かりづらいといった意見も得られた。また、実際の彫刻では彫刻刀の種類によってもそれぞれ異なる触

感が得られるが、本システムではこのような彫刻刀の種類や彫刻対象の木目、彫刻刀型デバイスの押し込み量などによって異なる触感を提示することができない。このような触感をリアルタイムに変更できる機構の追加についても、今後検討していく予定である。

提案システムでは HMD を装着する必要があるため、視野が狭く、首が疲れるといった意見があった。加えて、HMD は解像度が低く、結果が見えづらいといった問題も上がった。これらの問題は、今後、より高解像度かつ軽量で視野が広い HMD が開発・普及されることで解決できると考えている。また、解像度の問題により、提案システムでは細かな模様が彫りづらいといった問題が挙げられる。これは、ズーム機能など電子的な機能でカバーすることで改善できると考えている。

実際の彫刻刀では木材に彫刻刀が突き刺さるため、力の方向は刃先を当てた方向であるのに対し、提案システムでは木材に突き刺さる抵抗まで表現できていないため、力を圧力センサの面に垂直、つまり板に垂直な方向に加える必要がある。この違いに少し違和感を覚えるといった意見も得られた。

6.2 提案システムの利点

提案システムの利点として、実際の彫刻のように木目に引っ掛かって彫り進めなくなることや、思うように彫れないこと、木くずがでるといったことがないため、実際の彫刻と同じ感覚でありながら、実際よりも彫りやすかったといった意見も得られた。このことから、提案システムを用いることで、実際の彫刻と電子作業である利点の両方を実現することができていると考えられる。

7. まとめと今後の展望

本研究では、MR 空間において実際の彫刻と同様の操作で仮想物体表面に電子的に彫刻が可能なシステムの提案を行った。まず実世界での彫刻作業を分析し、彫刻刀と彫刻面のなす角度や、彫刻刀の押しつけ量といった要素が彫り跡にどのように影響を与えるのかを確認した。その結果をもとに彫刻作業のモデル化・デバイスの設計・実装を行った。さらに、提案システムと一般的に描画ツールとして用いられる液晶タブレットを使用した電子彫刻システムで、ユーザの行動や印象にどのような違いが見られるのか体験を通じて確認した。その結果、液晶タブレットを使用した場合と比べて作業の簡便性は低下するものの、彫刻作業を模倣することで作業における彫刻らしさやユーザの満足度が向上することが確認された。

今後は、複雑な 3D 形状への彫刻を可能にするとともに、6 章で述べたように彫刻刀や彫り方などによって提示する触感を動的に変更できる触感提示機構を備えたデバイスを提案する予定である。また、彫刻時の要素として、木を削る際の音も非常に重要な要素の一つである。今回の実験においても、紙やすりと板がこすれあうこと

で発生する音によって彫刻を行っている感覚がしたという意見が多く得られた。しかし、現段階では彫刻刀の種類に合わせた音を提示することができていない。そこで今後は、彫刻刀の種類や彫りの深さによって動的に音を変更し提示する機能も追加する予定である。

今回は実際の彫刻作業における操作方法や操作感の模倣を目的としていたため、見た目の表現に関しては改善点が多く存在する。表現方法に関しては、既存研究のように法線マップや物理モデルを使用した手法を適用することで、よりリアルな彫り跡を再現することができる完成度の高いシステムになると考えている。

参考文献

- [1] 脇田航, 井門俊: 仮想彫刻に基づくリアルタイム法線マップ生成システム; 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 12, pp. 3670-3679 (2007)
- [2] Mizuno, S., Okada, M., and Toriwaki, J.: Interactive designing system with virtual sculpting and virtual woodcut printing; *FORMA*, Vol. 15, No.1, pp. 183-193 (2000)
- [3] 岡田稔, 水野慎士, 鳥脇純一郎: モデル駆動による仮想彫刻と仮想木版画; 芸術科学論文誌, Vol.1, No.2, pp 74-84
- [4] Mizuno, S., Kobayashi, D., Okada, M., Toriwaki, J., and Yamamoto, S.: Creating a Virtual Wooden Sculpture and a Woodblock Print with a Pressure Sensitive Pen and a Tablet; *FORMA*, Vol.21, No.1, pp.49-65 (2006)
- [5] 水野慎士: 彫刻および版画の物理モデル駆動に基づく対話的 CG 作成システムの実用化に関する研究; 科研費若手研究 (B), <https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-17700104/>, 2005 年 4 月 21 日 (最終閲覧日: 2017 年 11 月 16 日)
- [6] Zoran, A., Paradiso, J.: FreeD – A freehand digital sculpting tool; Proc. CHI'13, pp. 2613-2616 (2013)
- [7] Mueller, S., Lopes, P., and Baudisch, P.: Interactive Construction: Interactive fabrication of functional mechanical devices; Proc. UIST'12, pp 599-606 (2012)
- [8] Follmer, S., and Ishii, H.: kidCAD: Digitally remixing toys through tangible tools; Proc. CHI'12, pp. 2401-2410 (2012)
- [9] Sheng, J., Balakrishnan, R., and Singh, K.: An interface for virtual 3D sculpting via physical proxy; GRAPHITE'06, pp. 213-220 (2006)
- [10] Arisandi, R., Otsuki, M., Kimura, A., Shibata, F., and Tamura, H.: Virtual Handcrafting: Building virtual wood models using ToolDevice; Proc. IEEE, Vol. 102, No. 2, pp. 185-195 (2014)
- [11] 久田理, 山本景子, 金谷一郎, 佐藤宏介: HYPERREAL 三次元形状デザイン支援システム; 情報処理学会論文集, Vol. 48, No. 12, pp. 3873 - 3881 (2007)
- [12] 山本景子, 金谷一郎, 佐藤宏介: 三次元形状デザインのための道具握り判別型インタフェース; 芸術科学会論文誌, Vol. 7, No. 3, pp. 102-112 (2008)
- [13] Hassenzahl, M.: The interplay of beauty, goodness, and usability in interactive products; Proc. Human-Computer Interaction 2004, Vol. 19, pp. 319-349 (2004)

(2018 年 2 月 23 日受付, 7 月 2 日再受付)

著者紹介

川越 真帆



2016 年立命館大学情報理工学部情報学科卒業. 2018 年同大学院情報理工学研究科博士前期課程修了. 現在, KDDI 株式会社所属. 在学中, 複合現実空間における電子彫刻システムの研究開発に従事.

山本 拓也



2017 年立命館大学情報理工学部情報学科卒業. 現在, 同大学院情報理工学研究科博士前期課程在学中. 複合現実空間における電子彫刻システムの研究開発に従事.

大槻 麻衣 (正会員)



2011 年立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程修了. 2008 年より 2011 年まで学振特別研究員 DC1. 2011 年 4 月より 2014 年 3 月まで同大学総合理工学研究機構ポストドクトラルフェロー. 2014 年 4 月より 6 月まで同プロジェクト研究員. 2014 年 7 月より筑波大学システム情報系助教. 博士 (工学). 複合現実感, 3 次元インタフェースの研究に従事. 情報処理学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM 各会員. 日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会論文賞を受賞.

柴田 史久 (正会員)



1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 1999 年同研究科博士後期課程修了. 大阪大学産業科学研究所助手を経て, 2003 年 4 月より立命館大学理工学部助教授. 同大学情報理工学部准教授を経て, 現在, 同教授. 博士 (工学). モバイルコンピューティング, 複合現実感等の研究に従事. 日本バーチャルリアリティ学会複合現実感研究委員会幹事. IEEE, 日本バーチャルリアリティ学会, 情報処理学会等の会員. 日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞・論文賞, ヒューマンインタフェース学会論文賞を受賞.

木村 朝子 (正会員)



1996 年大阪大学基礎工学部卒業. 1998 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 同大学助手, 立命館大学理工学部助教授, 科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て, 2009 年 4 月より立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授. 現在, 同教授. 博士 (工学). 実世界指向インタフェース, 複合現実感, ハプティックインタフェースの研究に従事. 情報処理学会, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM, IEEE 各会員. 日本 VR 学会学術奨励賞・論文賞, ヒューマンインタフェース学会論文賞, 情