

# 複合現実型電子彫刻システムにおける 振動を用いた触感提示法の実現

巖 侑真<sup>†1</sup> 川越 真帆<sup>†2</sup> 大槻 麻衣<sup>†3</sup> 柴田 史久<sup>†1</sup> 木村 朝子<sup>†1</sup>  
立命館大学 情報理工学部<sup>†1</sup> 同 大学院情報理工学研究科<sup>†2</sup> 筑波大学<sup>†3</sup>

## 1. はじめに

我々は、複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術と彫刻刀を模した入力デバイスを用いて、MR 空間において仮想的な彫刻作業を行うシステムの開発を行っている [1]。ユーザは彫刻刀型デバイスを利用し、実物体にデバイスを押しつけ、なぞるような操作を行うことで、実物体に重畳描画した仮想の 3D モデル上に彫り跡を付けることができる (図 1)。このシステムでは、デバイス先端に装着したやすりによって簡易的な反力提示を行っていたが、実際の彫刻作業時に得られるような触感までは表現できていなかった。そこで、本研究ではシステムの拡張として、振動を用いた彫刻時の触感の表現手法を提案する。

関連研究として、Cho ら [2] の「RealPen」ではペンで紙に線を書いた際の振動と音を収録・解析したものを、振動としてスタイラスペンに提示することで、ディスプレイ上でも紙に近い筆記感覚を再現することに成功した。また、Romano ら [3] は、素材の異なるテクスチャをペンでなぞった際の凹凸を記録し、振動として提示することで、質感の違いを表現する方法を提案している。本研究では、これらの手法を参考にしつつ、ユーザのデバイス操作に合わせた振動を提示することで、より実際の彫刻に近い触感を提示可能なシステムを実現した。

## 2. 彫刻作業時の触感の分析

実際に彫刻作業を行い、触感に影響を与える要素を分析した。彫刻作業時の触感に影響を与える要素として、「反力」と「振動」の二つが考えられる。反力に関しては、先行研究 [1] でやすりをデバイスの先端に取り付けることで簡易的に表現されている。よって、本研究では彫刻作業時に発生する「振動」に着目し、従来のシステムにこれを付加することにした。

まず、加速度センサ (Seed Studio 製 ADXL345) を彫刻刀に取り付け、実際に彫刻作業を行った際の振動を計測した。その結果、彫刻作業時には微弱な振動が常に発生しており、また、時折、比較的強い振動が発生していた。この強い振動は「押しつけ量の変化」「彫刻刀の種類」「木目に対する彫りの方向」に応じて強度や頻度が変化しており、いずれも「単位時間あたりに一度に切断する木目の数」で説明できる。我々はこれをモデル化することで彫刻時の触感を提示できると考えた。以下に、その詳細を記す。

【押しつけ量の変化】実際の彫刻では、彫刻刀の押しつけ量に比例して、振動が強くなった。これは押しつけ量が大きい場合、一度に切断する木目の本数が多くなるため、振動強度が大きく、逆に、押しつけ量が小さい場合は切断する木目の本数が少なくなり、振動強度が小さく



図1 複合現実空間での彫刻作業の様子

表 1 彫刻作業時の触感表現の設計方針

表現する触感	パラメータ	頻度	強度
	彫刻刀の種類		丸刀>平刀>三角刀
木目に対する彫りの方向		垂直>平行	
押しつけ量			大きい>小さい

なっていると考えられる。

【彫刻刀の種類】丸刀は三角刀や平刀と比べて強い振動が頻繁に発生する傾向が観察された。刃先の形状が U 字型になっていることから、一度に切断する木目の本数が他の彫刻刀と比べて多くなり、振動が強くなったと考えられる。三角刀の場合は、刃先が V 字型になっているため、丸刀と比べて 1 度に切断する木目の本数が少なくなり、結果として強い振動の発生頻度・強度ともには丸刀よりも少なく、小さくなると考えられる。平刀の場合、刃先の形状が平らなため、丸刀よりも彫りの横幅は広いが、彫りの深さは浅くなる。結果として木目の切断本数が丸刀よりも少なくなり、強度は、丸刀と同じかそれよりも低くなる傾向が確認された。また、彫りの横幅、深さの変化が少ないことから、強い振動が発生する頻度も低くなる。

【木目に対する彫りの方向】木目の方向に対して垂直に彫刻した場合、木目を横断するため、木目に対して平行に彫刻した場合よりも強い振動の頻度が高くなる。この傾向は、刃先の種類によらず同様であった。

以上の分析結果より、提案システムにおける触感表現の設計方針を表 1 のようにまとめた。彫刻刀の「刃先の種類」および、ユーザのデバイスの操作 (押しつけ量の変化、木目に対する彫りの方向) に応じた強い振動を提示することで彫刻作業時の触感を表現する。

## 3. 彫刻刀型デバイス

電子彫刻システムのシステム構成を図 2 に示す。MR 空間の提示には両眼立体視可能なビデオスルー型のヘッドマウントディスプレイ (Canon 製 MREAL HM-A1) を使用している。彫刻刀型デバイスや頭部 (カメラ位置)、仮想物体の位置姿勢推定には磁気センサ (Polhemus 製 FASTRAK) を用いており、デバイスの

“Implementation of tactile feedback using vibration for mixed reality based virtual carving system”

<sup>†1</sup> College of Information Sci. and Eng., Ritsumeikan University

<sup>†2</sup> Graduate School of Information Sci. and Eng., Ritsumeikan University

<sup>†3</sup> University of Tsukuba

後端と HMD, 仮想物体 (彫刻対象) を重畳描画する実物体に取り付けている。

作製したデバイスを図 3 に示す。デバイスの先端の圧力センサ (Interlink Electronics Inc. 製 FSR400 SHORT) によってデバイスを実物体へ押しつけた際の圧力を取得する。本体は直径 16 mm・全長 192 mm のチューブを用い, 振動提示のためのアクチュエータ (ALPS 電気製 Force Reactor) を内蔵した。また, 先行研究と同様, 反力を提示するために先端にやすりを取り付けた。

#### 4. 設計方針の妥当性の確認

設計方針の妥当性について体験を通して確認した。体験では, 微弱な振動のみを提示する場合 (図 4) と微弱な振動に時折強い振動を発生させる場合 (図 5) を比較する。微弱な振動は, どの彫刻刀においても大きな差は見られなかったため, 今回は三角刀の波形から, 強い振動が発生していない部分を使用した。強い振動を発生させる提示パターンは, 微弱な振動を提示している間に, ランダムなタイミングで強い振動を提示した。以下に体験手順を示す。

- (1) 実際の丸刀, 三角刀, 平刀の 3 種類の彫刻刀を使用させ, 押しつけ量の異なる場合と木目に対する彫りの方向を変更した場合を彫刻させた。
- (2) デバイスを用いて 2 種類の触感提示 (微弱な振動のみを提示する場合, 微弱な振動に時折強い振動を発生させる場合) を比較させた。
- (3) システムについて自由にコメントさせた。

微弱な振動のみを提示した場合, 木目に引っかかった触感が少ないため, 三角刀での彫刻や押しつけ量が小さいときの触感を表現できた。一方で, 一定の振動に慣れてしまい, 彫刻している感覚が鈍くなるという意見も得られた。時折強い振動を提示した場合, 強い振動によって木目に引っかかる触感を表現できているため, 丸刀・平刀で彫刻した場合や, 押しつけ量が増加した場合, 木目に対して垂直に彫刻した場合の触感を表現できた。

以上の結果から, 強い振動を付与することで, 彫刻作業時の触感を表現できることを確認した。

#### 5. 触感提示モデル

設計方針に基づき, 振動の強度, 発生頻度を決定するモデルを設計した。

先行研究[1]では, 彫刻刀を彫刻面に押し付ける力を  $P$ , 彫刻刀と実物体のなす角度を  $\theta$  (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, 彫り跡の横幅と深さ (横幅  $w$ , 深さ  $d$ ) は以下の式で表される。

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

$$w = w_{\max} \cdot d \quad (2)$$

なお,  $P_{\max}$  は彫刻刀の先端にかかる最大の圧力,  $w_{\max}$ ,  $d_{\max}$  は彫りの形状の横幅と深さの最大値である。

このとき, 一度に切断する木目の本数  $g$  は次式のように定義した。

$$g = (g_w \cdot (w/w_{\max}) + g_d \cdot (d/d_{\max})) \cdot C_{Type} \quad (3)$$

ここで,  $C_{Type}$  は刃先の形状によって異なる係数 ( $0 \leq C_{Type} \leq 1$ ),  $g_w$ ,  $g_d$  は, 横方向と深さ方向の単位長さ当たりの木目の本数を表す ( $g_w$ ,  $g_d$  は自然数であり, これを変更することで任意に変更可能)。

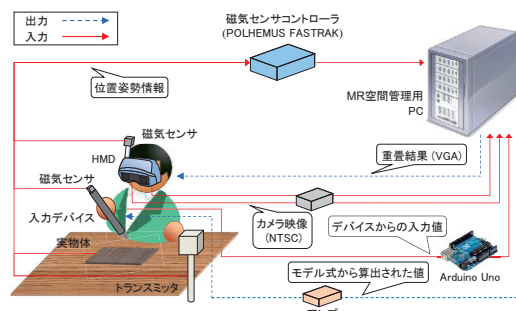


図 2 システム構成



図 3 作製したデバイス

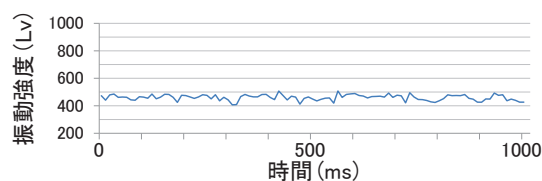


図 4 微弱な振動の波形

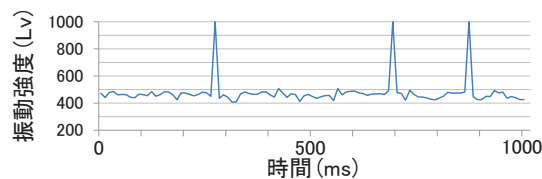


図 5 時折強い振動を発生させた波形

また, 最小振動強度を  $A_{\min}$ , 最大振動強度を  $A_{\max}$ , 単位時間当たりのデバイスの移動距離を  $l$ ,  $l_{\max}$  を単位時間当たりのデバイスの最大移動距離とすると, 振動の強度  $A_{out}$  は次式で表される。

$$A_{out} = g \cdot l/l_{\max} \cdot (A_{\max} - A_{\min}) + A_{\min} \quad (4)$$

木目に垂直な場合, 木目の間隔  $i$  を設定し, 移動距離  $l$  が木目の間隔よりも長い ( $i < l$ ) 場合に木目を切断したとして, 強い振動を提示する。

#### 6. むすび

本研究では, MR 型電子彫刻システムに振動による触感提示方法を用いて彫刻作業時の触感の表現に取り組んだ。ユーザのデバイス操作に合わせた振動を提示することでより現実に近い触感を提示可能なシステムの提案・実装を行った。今後は, 反力を増強する仕組みの提案や音と組み合わせることで, 触感のさらなる向上を行う。

#### 参考文献

- [1] Kawagoe, M., et al.: Sharpen Your Carving Skills in Mixed Reality Space, Adjunct Proc. 4th ACM Symp. on Spatial User Interaction (SUI 2016), p. 161 (2016).
- [2] Cho, Y., et al.: RealPen: Providing Realism in Handwriting Tasks on Touch Surfaces using Auditory-Tactile Feedback, Proc. 29th ACM Symp. on User Interface Software and Technology (UIST 2016), pp. 195 - 205 (2016).
- [3] Romano, J.M., et al.: Creating Realistic Virtual Textures from Contact Acceleration Data, Proc. IEEE Transactions on Haptics, Vol. 5, No. 2, pp. 109 - 119 (2012).