

複合現実空間を用いた電子彫像制作システム ～彫刻刀デバイスを利用した表面加工

西岡大樹^{†1} 川越真帆^{†2} 鈴木大智^{†2} 柴田史久^{†1} 木村朝子^{†1}

概要：本稿では、複合現実感 (MR) 空間において電子的に彫像制作を行うシステムを提案する。実世界での彫像制作には、概形の彫り出しから部分の造作、表面の模様を彫り込みなど多くの工程が存在するが、本研究では仮想 3D 物体表面に模様を彫り込む操作を対象とする。3D プリンタの急速な技術発展にともない、ユーザが自ら 3D モデルを作成し、それを実物体として出力することが可能となった。しかし、彫像にみられるような表面の凹凸を 3D モデルに自在に施すことは容易でない。そこで、我々は彫刻刀型の入力デバイスを利用し、テクスチャのない実物体にこのデバイスを押付け、なぞることで、その実物体に重量描画された仮想 3D モデルに彫り跡を付ける電子彫像制作システムを構築した。

キーワード：道具型デバイス、複合現実感、彫刻、表面加工

Mixed Reality Based Virtual Carving System – Surface Carving Using Tool Device

HIROKI NISHIOKA^{†1} MAHO KAWAGOE^{†2} DAITI SUZUKI^{†2}
FUMIHISA SHIBATA^{†1} ASAKO KIMURA^{†1}

Abstract. In this paper, we propose virtual carving system in a Mixed Reality (MR) space. Although there are some steps in real world carving such as carving a rough outline, shaping sections and engraving marks on the object's surface, we focused on engraving marks on 3D virtual object's surface. Thanks to the rapid progress of 3D printers, we can easily print 3D objects that we made ourselves. However, it's difficult to freely engrave marks on the 3D virtual object's surface as seen on real carvings. Therefore, we developed a virtual carving system using Carving Tool Device. By touching and tracing the input device on the real object, the user can carve on the 3D virtual object's surface which is superimposed on the real object.

Keywords: Tool Device, Mixed Reality, Surface Carving

1. はじめに

近年の 3D プリンタの急速な技術発展にともない、ユーザが自ら 3D モデルを作成し、それを実物体として出力することが可能となった。3D プリンタで物を出力するには、事前にモデリングソフトなどによって作成したモデルデータを用いて造形を行う。しかし、既存のモデリングソフトの多くは、2D のディスプレイ上でマウスやキーボードといった入力装置を用いて作業を行うため、高機能である一方で、画面上にボタンが並び、使い慣れていない者にとっては操作を覚えるのに時間を要する。また、3D のモデルを作成する場合にも、2D のディスプレイ上で作業を行うため、立体形状の把握が直観的ではない。

これに対して、本研究グループでは、複合現実感 (MR) 技術と、道具の形状や操作感を活用した道具型デバイスを用いたモデリングシステムや描画システムを提案してきた [1]-[3]。これらのシステムでは、ユーザは HMD を装着し、



図 1 複合現実空間での電子彫像制作 (イメージ)

Figure 1 Image of virtual carving in mixed reality space.

その眼前に現実世界と仮想世界が融合した空間が視覚的に提示される。また、操作には日頃慣れ親しんだ既存の道具の形状や操作感をメタファとして利用した道具型デバイスを用いることで、ユーザはその用途や利用方法を直観的に把握することが可能である。

本研究では、木材加工を模したモデリングシステム [1] の拡張として、仮想物体の表面に電子的に彫像作業を行うことが可能なシステムの実現を目指している (図 1)。具体的には、木材加工を模したモデリングシステムやその他の

^{†1} 立命館大学大学院 情報理工学研究科
Graduate School of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

^{†2} 立命館大学 情報理工学部
College of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

モデリングソフトで制作された 3D モデルデータに対して、表面に木彫りで施されるような凹凸を付与するシステムを目指す (図 2)。

本稿は、その第 1 歩として、まず実物の平らな木材に重畳描画した CG の木材を対象とし、彫刻刀デバイスを使って彫刻するシステムを提案・試作する。

本稿では、まず 2 章で関連研究に対する本研究の位置付けを行い、3 章で実際の彫像作業の分析とそのモデル化について述べる。4 章では、システム構成、試作デバイス、彫り跡の表現方法について述べる。最後に本稿をまとめ、今後の展望について報告する。

2. 関連研究

物体表面に凹凸を付ける研究はこれまでに数多く行われてきた[4]-[7]。Mizuno ら[4]は VR 空間で 3 次元モデルの表面に彫刻可能なシステムを提案している。また、小林ら[5]は、筆圧感知式液晶ペンタブレットを用いることで、筆圧を取得し、仮想の彫刻刀やパレンを用いて版画を直観的に可能とするシステムを提案している。しかし、これらのシステムは、操作画面が 2D のディスプレイ上であり、立体形状の把握が直観的ではなかった。

一方、MR 技術を用いたモデリングシステムとして、Yee ら[8]の研究がある。このシステムでは、ユーザは HMD を装着し、現実世界を見ながらモデリング作業を行うことが可能である。モデリングには、ワンド型のデバイスを用い、作成したい形状をなぞることでモデルを作成可能である。しかし、モデルの大まかな形状を作成することは可能である一方で、モデルの表面に模様や凹凸を付けるといった作業は困難であった。

そこで、本研究では、MR 空間において電子的に彫像制作を行うシステムを提案する。我々の先行研究[1]において、仮想物体の大まかな形状を作成可能なシステムを提案したため、本研究では、物体表面に模様や凹凸を付けるといった細かな操作を「彫像」と定義した。提案するシステムでは、MR 技術を用いることで、作業時には現実空間を見ながら、道具型デバイスを用いて直観的に仮想物体への彫像作業が可能なシステムを目指す。

3. 実世界での彫像作業の分析

本研究では、MR 空間において仮想物体表面に、直観的に木彫りのような凹凸模様を彫刻することが可能な電子彫像制作システムの実現を目指す。

我々は、まず実世界で行われる彫像作業を分析した。実世界の彫像作業で用いられる道具は、彫像対象の素材により様々である。例えば、素材が木材であれば、ノコギリやヤスリ、鉋や金槌、彫刻刀などが用いられ、粘土であれば、スクレイパーやヘラ、ナイフやワイヤが用いられる。他にも金属では、溶接機や金槌が用いられ、石ではノミや金槌が用いられる。このように、操作対象の材質によって使用



図 2 電子彫像制作システムのワークフロー

Figure 2 Workflow of MR virtual carving system.



図 3 彫刻刀を用いた作業

Figure 3 Work using carving tools.

する道具は異なり、その際に得られる感覚も異なるため、すべての状況を網羅し、システムで実現するのは現実的ではない。そこで我々は、研究の第一歩として先行研究でも取り扱った木材を対象とする。

木材に対して彫刻を行う際には、一般的に彫刻刀などを用いるが、物体を大きく変形させる際にはノミや木槌を、物体を薄く削り平らにする際には鉋などを用いる。さらに、特定作業時には特殊道具を用いるなど、その作業内容によっても使用する道具は多岐に渡り、作業方法も異なる。本研究では、物体の大きな変形ではなく、図 3 に示すような物体表面に模様や凹凸を付けるといった細かな作業を想定するため、彫刻刀を用いた作業を対象とする。

彫刻刀は、広い面を大きく削ったり細かな作業を行ったりする際に使用する印刀、鋭い溝を掘る際に利用する三角刀など、目的によって使用する刃先が異なる。一般的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 4)、更にそれぞれの種類で刃先の大きさの異なるものが存在する。

丸刀や三角刀による彫刻では、彫刻刀の押し付け量に比例して彫りが深くなり、彫り幅が大きくなる。更に、彫刻面に対して彫刻刀を傾けた場合には彫りが浅くなり、彫り幅が細くなる。そしてこのような彫る操作を繰り返すことで、物体表面に図 5 に示すような凹凸を付けることができる。

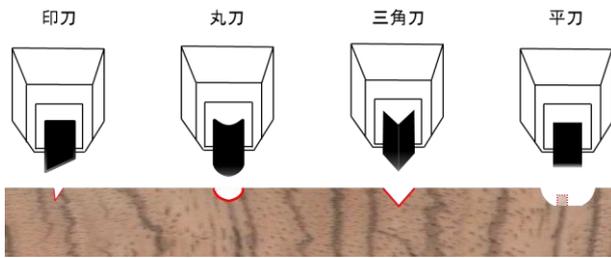


図4 各彫刻刀の彫り跡

Figure 4 Carving tools and their carving marks (cross-section).



図5 彫像の表面例

Figure 5 Surface example of sculpture.

また、彫刻刀の刃が向いている方向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。

4. 彫り跡表現モデル

前章の分析結果から、彫刻刀デバイスの「刃先の位置」「押し付け量」「彫刻面とデバイスのなす角度」から、彫り跡の「位置」「深さ」「幅」を求める彫り跡表現のモデルを作成する(図6)。

まず、彫り跡の形状や幅は彫刻刀の種類によって変わる。例えば、実際の丸刀と三角刀の彫り跡を比較すると、三角刀の横幅は彫りが深くなっても丸刀ほど大きく変化しない。そこで本研究では、実際の彫刻刀による彫刻結果(図4, 7)を基に、彫刻刀ごとに彫り跡の基本形状を定め、これを彫刻刀デバイスの押し付け量や対象とのなす角度に応じて変形させ、デバイスの刃先が彫刻対象と接した位置に並べることで彫り跡を実現する。

この彫り跡の変形方法であるが、まず彫刻刀を実物体に押し付ける力を P とすると、 P が大きいと彫りが深くなり、 P が小さいと彫りが浅くなる。また、彫刻刀と実物体がなす角度を 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 が小さいと加える力の方向が面に対して水平に近づき、 θ が大きいと面に対して垂直に近づく。この角度が垂直に近づくほど、物体表面に対して垂直に彫刻刀を差し込む力が大きくなるため、彫りの深さが深くなる。このことから、彫刻刀を実物体に押し付ける圧力の最大値を P_{max} 、彫り跡の深さ方向への最大拡大率を d_{max} とすると、彫りの深さ方向への拡大率 $scale_d$ は次式で表される。

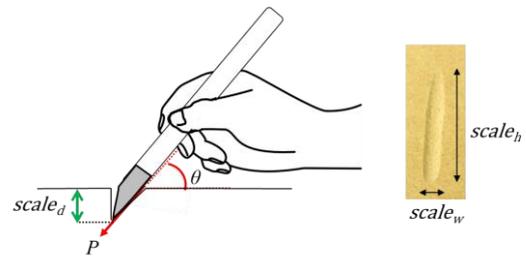


図6 彫刻動作のパラメータ

Figure 6 Parameters of virtual carving.



図7 丸刀の彫り跡の例

Figure 7 Example of carving marks by U-shaped gouge.

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

また、彫り跡の幅は彫りの深さに比例して変化することから、彫刻刀ごとでの基本形状に対する幅の拡大率 $scale_w$ は以下のように表される。

$$scale_w = w_{max} \cdot \frac{P}{P_{max}} \sin \theta \quad (2)$$

一方、彫刻面とデバイスのなす角度が浅い(小さい)ほど、彫刻刀にかかる力が前進する方向に分散するため、結果、彫り跡の長さが長くなると考えられる。そこで、彫刻刀ごとでの基本形状に対する長さ方向の拡大率 $scale_h$ を以下のように表す。

$$scale_h = h_{max} \cdot \frac{P}{P_{max}} \cos \theta \quad (3)$$

但し、 w_{max} 、 h_{max} は、彫り跡の基本形状に対する幅と長さの最大拡大率を表す係数である。

5. 電子彫像制作システムの試作

5.1 システム構成

提案する電子彫像制作システムを実現するハードウェア構成を図8に示す。MR空間の映像提示に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VH-2002を用いた。HMDに搭載されたカメラからの映像は、ビデオキャプチャカードであるViewCast社製Osprey-440を用いてPCへ取り込む。また、ビデオカードからの2出力をHMDの右目、左目ディスプレイの入力に用いる。HMD、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

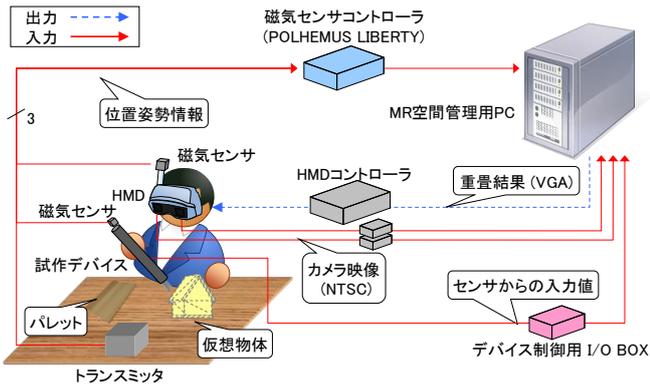


図 8 システム構成

Figure 8 System configuration.



図 9 試作デバイス

Figure 9 Prototype of carving tool device.

LIBERTY を用いる。トランスミッタを任意の位置に固定し、HMD および彫刻刀デバイスに取り付けられたレシーバで、トランスミッタとレシーバ間の相対的な位置姿勢を連続的に取得している。なお、PC との接続は USB 端子を介して行う。レンダリング時のカメラ位置姿勢に LIBERTY 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。

5.2 彫刻刀デバイス

試作した彫刻刀デバイスを図 9 に示す。デバイスの先端に圧力センサ、後端に前述した磁気センサを取り付け、実物体へ押しつけた際の圧力を検出する。取得した圧力の値を 4 章で提案したモデル式に適用することで、圧力に応じた彫り跡を表現する。

5.3 実装

彫り跡の CG 表現には様々な方法が考えられるが、本研究では実時間での処理と木彫りらしい彫り跡表現を両立するため、彫り跡をテクスチャとして表示する。具体的には、ユーザが彫刻刀デバイスを操作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。図 10 に、提案手法による彫り跡を示す。

【彫りの深さの表現】

彫りの深さを表現するにあたり、実世界での彫刻作業時の彫り跡を確認した。実際の彫り跡では彫りが深くなるに

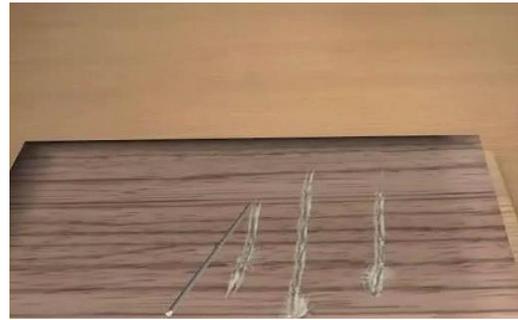


図 10 提案システムによる彫り跡

Figure 10 Virtual carving strokes of our system.

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。

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、彫り跡の色味 $C(0 < C \leq 1.0)$ を次式で算出する。

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

【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、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一致率から判定した。

6. むすび

本稿では、MR 空間において仮想物体表面に電子的に模様や凹凸を付けることが可能なシステムの提案を行った。

システムの提案にともない、まず実世界での彫刻作業を分析し、どういった要素が彫り跡に影響を与えるのか確認した。その結果、彫刻刀と操作対象面のなす角度や、彫刻刀に加える力によって彫り跡が変化する点に着目し、彫刻作業のモデル化を行った。また、彫刻刀の刃先の種類によって彫り跡の縦幅や横幅が異なるため、彫刻刀ごとにもモデル化を行った。さらに、自然な彫り跡を表現するために、彫りの深さの表現などに取り組んだ。

今後は、複雑な形状への彫刻を可能にするとともに、電

子的な彫刻ならではの機能（Redo, Undo や指定領域を一括して彫刻する機能など）やその他必要な機能の拡充を行う。また、提案システムについて運用を行い、有用性を確認するとともに、改善点について議論する。

参考文献

- 1) R. Arisandi, Mai Otsuki, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura: Virtual Handcrafting: Building virtual wood models using ToolDevice, Proc. IEEE, Vol. 102, No.2, pp. 185 - 195 (2014)
- 2) 大槻麻衣, 杉原賢次, 中嶋友美, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 絵筆の描き味を活かした複合現実型描画システムと筆型対話デバイス, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 3, pp. 357 - 367 (2010)
- 3) 杉原賢次, 大槻麻衣, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 仮想物体への描画感を達成した新筆型対話デバイスの開発, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 14, No. 1, pp. 31 - 42 (2012)
- 4) S. Mizuno, M. Okada, and J. Toriwaki: Interactive Designing System with Virtual Sculpting and Virtual Woodcut Printing, *FORMA*, Vol. 15, No.1, pp. 183 - 193 (2000)
- 5) 小林大吾, 水野慎士, 岡田捻, 鳥脇純一郎, 山本眞司: 筆圧に基づく操作の強さを考慮した仮想彫刻・版画システム, インタラクション 2005 論文集, pp. 43 - 44 (2005)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 8) B. Yee, Y. Ning, and H. Lipson: Augmented Reality In - Situ 3D Sketching of Physical Objects, Proceedings of CHI 2009, pp. 1 - 4 (2009)