

2010年度 卒業論文

ノミの切削工程を基にした
モデリング手法の提案

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト

学籍番号 M0107289

高橋 健太

2010年度 卒業論文概要

論文題目

ノミの切削工程を基にした
モデリング手法の提案

メディア学部

学籍番号：M0107289

氏名

高橋 健太

**指導
教員**

渡辺 大地 講師

キーワード

ノミ、彫刻、力覚フィードバック、
点群、3Dモデリング、CG

現在3DCG技術の発展に伴い、CGは非常に多くの分野において使われている。3DCGを制作するためのモデリングシステムは、プロフェッショナルが使用することを考慮しているため、操作にある程度コンピュータやCGの専門知識が必要になり、CGの知識やコンピュータの使用経験がない者にとって手を出しにくい傾向がある。近年、CGやコンピュータの知識があまりない人でも、操作自体を楽しみながらモデリングを行える手法が提案されている。絵を描く、切るなど、日常において身近でイメージがしやすい3次元形状の形成方法を用いることで、CGやコンピュータの専門知識を有さない人でも、気軽に楽しみながらCGコンテンツの制作をすることが可能になると期待できる。

本研究では、形状生成の工程として、ノミをげんのうで叩きながら素材を彫る彫刻の粗彫りという作業工程に注目した。彫刻における粗彫りは3次元形状の生成手段として一般的に広く認知されており、工程がイメージしやすい手法であるため、これを用いたモデリングシステムの操作は、CG制作の初心者にとって理解しやすいものとなることが期待できる。粗彫りは、げんのうを振るという動作や、ノミを叩く微妙な力加減によって彫る量を調整するなど、マウスやキーボードでは直観的な操作を十分に再現できない工程があった。立体的な操作が可能であり、反力や振動を提示する機能を持ったデバイスを用いることで、げんのうを振る動作や、ノミを叩いたときに生じる反動などを提示することを可能にした。ユーザは画面上のノミとげんのうを、それぞれに対応した力覚デバイスを用いて操作し、素材モデルを削るようにモデリングする。叩いた際の感触を再現するため、画面上のノミを叩いた際にデバイスから反力と振動を提示することで、叩いた際の感触を再現した。彫る対象となる素材モデルは、内部構造を表現し、かつユーザの操作に対してリアルタイムな形状変化に対応するためポイントベースを用いた手法によって描画した。粗彫りの作業工程がモデリングの操作において有用性があるか調査するため、本手法のモデリングシステムを試作しユーザテストを行った。ユーザからの意見、感想を分析し、本手法を用いることでCG制作の知識がなくともモデリングシステムの操作が容易に行えることを実証した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	論文の構成	5
第2章	提案手法について	7
2.1	提案手法によるモデリングの手順	7
2.2	各モデルの座標系	8
2.3	げんとうモデルの操作	9
2.4	ノミモデルの操作	13
2.5	素材モデルの描画	14
2.6	触覚・力覚提示の手法	14
2.7	素材を削る際の反力の計算方法	15
2.8	ノミモデルをげんとうモデルで叩いた際の力の計算方法	17
第3章	提案手法の評価実験	19
3.1	検証方法	19
3.2	ユーザテストの対象	19
3.3	ユーザテストの手順	20
3.4	制作時間の結果と比較検証	22
3.5	操作と形状生成についての結果と比較検証	22
3.6	力覚提示の結果と検証	25
3.7	考察と今後の展望	26
第4章	まとめ	29
	謝辞	31
	参考文献	32

目 次

1.1	ノミ	3
1.2	げんのう	3
1.3	素材である木材に粗彫りを施している様子	3
2.1	提案手法を用いたモデリングシステムを操作している様子	8
2.2	げんのうモデル	8
2.3	ノミモデル	8
2.4	素材モデルに切削処理を行う様子	9
2.5	Wii リモコン	10
2.6	Wii リモコンの加速度センサーの構造	11
2.7	下を向いた状態	12
2.8	右斜め奥方向を向いた状態	12
2.9	切削領域を縮小	12
2.10	切削領域を拡大	12
2.11	設置型力覚デバイス Novint Falcon	13
2.12	立方体を形成する点群の集合	15
2.13	ノミモデルと素材モデルが接触した際の反力	16
2.14	ノミモデルを叩いた際に発生する力	17
3.1	正面から見た形状	20
3.2	斜め下から見た形状	20
3.3	形状の輪郭を描画したモデル	20
3.4	モデリングシステムに対する初心者の評価	23
3.5	モデリングシステムに対する経験者の評価	23
3.6	どちらの方が良かったかについて初心者の評価	24
3.7	どちらの方が良かったかについて経験者の評価	24
3.8	力覚提示について初心者の評価	25
3.9	力覚提示について経験者の評価	25

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

現在 3DCG 技術の発展に伴い、CG はエンターテインメント、広告、医療、工業設計など非常に多くの分野において使われている。3DCG を制作するためのモデリングシステムは、多くの場合設計者やデザイナーなど、製品に利用するために CG を用いるプロフェッショナルが使用することを考慮している。そのため、多くのモデリングシステムは高価であり、操作にある程度コンピュータや CG の専門知識が必要になり、CG の知識やコンピュータの使用経験がない者にとって手を出しにくい傾向がある。

近年、CG やコンピュータの知識があまりない人でも、わかりやすい操作でモデリングが行える手法の研究が盛んである。数多くの研究があるものとしてスケッチ入力によるモデリングを行う手法 [1][2] があり、代表的なものでは五十嵐ら [3] はスケッチ感覚で行う 3 D モデリングシステム「Teddy」を提案した。他にも大和田ら [4] は、CG コンテンツを利用して食材を切る感覚を楽しむためのシステムとして、包丁を扱うようにモデリングを行う手法を提案した。荒田ら [5] は、仮想粘土細工システムを作成し、粘土のような特性を持ったモデルを扱う 3 次元形状モデリングを提案した。このように、絵を描く、切るなど、日常において身近でイメージがしやすい 3 次元形状の形成方法を用いることで、CG やコンピュータの専門知識を有さない人でも、理解しやすい操作で CG コンテンツの制作をするこ

とが可能になると期待できる。本研究においても、現実の形状生成方法を基にして、CG制作の知識や経験がない人にも扱いやすいモデリング手法を提案することを研究の方針とする。

また、ペンを扱うような操作が可能なペンタブレットなど、直観的な操作が可能な入力デバイスが普及し、一般的に扱えるようになった。このような入力デバイスを用いることで、マウスやキーボードなどのデバイスを使用するよりも、現実における形状生成の動作に近い操作が可能なモデリングシステムの研究がある。小林ら [6] は彫刻刀を用いて木材を削る作業工程に注目し、筆圧感知式のペンタブレットを用いた仮想彫刻・版画システムを提案した。今泉ら [7] は、ヒートカッターによる切断方法を基に、モデルの切断形状をスケッチ入力によって自由に設定できるモデリングシステムを提案した。しかし、ペンタブレットは2次元的な操作しかできないため、3次元空間上の物体を対象とするには、自由度の不足をボタンやメニューの選択による操作で補う必要がある。そこで、立体的な操作が可能なデバイスを用いることで、3次元空間上の位置を直接操作することが可能なモデリング手法がある。櫛田ら [8] や、瀬田 [9] は、ガラス細工の作業工程を基にした3次元自由形状モデリング手法を提案した。蛭田ら [10] は、Wii リモコン [11] を用いて仮想彫刻において直観的に彫刻刀を操作する手法を提案した。このように、現実における様々な形状生成法を基にしたモデリングシステムの研究がある。

本研究では、3次元空間における物体の形状生成の工程として、彫刻の粗彫りという作業工程に注目した。粗彫りとは彫刻において削る素材に対し、ノミをげんのうと呼ばれる金槌で叩いて素材を彫ることで、大雑把な輪郭を彫り出す工程のことである。げんのうは頭が2つの打面でできており、片方が平らな打面と、もう片方が若干丸みを帯びた木殺しと呼ばれる打面でできているのが特徴である。図 1.1 にノミと、図 1.2 にげんのうを提示する。



図 1.1: ノミ



図 1.2: げんのう

ノミとげんのうは主に石や木など、比較的硬い素材を削るために用いる。ノミを片方の手で持って素材にノミの刃を当てておき、もう片方の手に持ったげんのうでノミの柄を叩くことで、刃を素材に切り込ませながら素材を彫っていく。刃の形状や大きさによって細かく分けられたノミを使い分け、ノミの刃の傾きで彫っていく方向を調節し、ノミの柄を叩く力加減によって彫る量を調節して彫る。これにより、彫刻刀を使って彫るほど細かく彫ることはできないが、硬く厚みのある素材であっても、ある程度の曲線や凹凸など輪郭を彫りだしていくことが可能である [12]。図 1.3 にノミとげんのうを使った粗彫りの様子を示す。



図 1.3: 素材である木材に粗彫りを施している様子

モデリングの操作を直観的なものにするために、彫刻の作業工程を用いた研究がある。具体例として、徳永ら [13][14] は、彫刻刀を使った彫刻の作業工程を、仮想空間上でそのまま再現してモデリングを行うシステムの開発を試みている。主に彫刻を体験するためや、直観的なモデリング手法を実現するために彫刻の作業工程が用いる。彫刻における粗彫りは3次元形状の生成手段として一般的に広く認知されており、工程がイメージしやすい手法である。しかし、ノミをげんのように叩きながら彫る作業工程を基にしたモデリングシステムはない。ノミをげんのように叩くという工程は、彫るという行為に強い印象を受けるため、作業を行う人に形状生成をする楽しさをもたらすことが期待できる。したがって、これを用いたモデリングシステムの操作も容易にイメージすることが可能であり、CG制作の経験や知識がない人でも受け入れやすいモデリングシステムを構築できることが期待できる。

げんのを振るという動作や、ノミを叩く微妙な力加減によって彫る量を調整するなどを再現するためには、操作デバイスを立体的に動かす必要である。そのため、マウスやペンタブレットなど2次元空間の位置しか取得できないものでは、直観的な操作を十分に再現できず、これらのデバイスを利用した小林らや、今泉らの手法では、粗彫りの動作を十分には再現できない。蛭田らは Wii リモコンを用いることで、立体的な操作が可能なモデリングシステムを提案している。この手法では、Wii リモコンによって操作するカーソルが、対象モデルと接触した際に領域を削るように処理を行うが、Wii リモコンでは力覚を提示する機能が振動機能しかなく、硬い素材を削るような感触は出せないと考えられる。ここで、立体的な操作が可能でありながら、反力や張力を利用することで力覚を提示する機能を持ったデバイスがある。近年多くの研究で利用されており、例として PHANToM[15]、SPIDAR[16]、Novint Falcon[17] などがある。本手法では、立体的な操作が可能でありながら、力覚を提示する機能を持った NOVINT 社の Novint Falcon を用いることで、ノミの立体的な操作を可能にし、叩かれたり素材を削った際に生じる反動を、反力を提示することで再現した。また、立体的な操作が可能であり、デバ

イス自体に発生する加速度を取得できる Wii リモコンを用いて、げんのを振るような動作を可能にした。

切削領域となる球で表したノミモデルと、直方体で表したげんのをモデルを、それぞれに対応した入力デバイスを用いて操作する。げんのをモデルの操作に任天堂株式会社の Wii リモコンを使用することで、力加減を調節しながらげんのをモデルを振る操作を実現し、ノミモデルの操作に NOVINT 社の Novint Falcon を使用することで、ノミモデルの立体的な操作を実現した。また、叩いた際の感触を再現するため、画面上のノミを叩いた際に Novint Falcon から反力を提示しつつ Wii リモコンを振動させることで、叩いた際の感触を再現した。彫る対象となる素材モデルは、内部構造を表現し、かつユーザの操作に対してリアルタイムな形状変化に対応するため、ポイントベースを用いた手法によって描画した。また、ポイントベースによる手法を用いたことで、素材を削るようなモデルの変形処理を行い、素材モデルが変形したことによる反力の変化を再現することができた。

粗彫りの作業工程がモデリングの操作において有用性があるか調査するため、アンケート調査を行った。アンケートは CG モデリングソフトの使用経験が浅い人を対象に、本手法を用いたモデリングシステムを使用してモデルの作成をしてもらい、操作の感覚についての感想を述べてもらった。集計したユーザからの意見・感想と、操作しているユーザの様子を分析し、粗彫りの作業工程を用いたモデリングシステムが、CG 制作の知識があまりない人でも簡単に扱うことができることを実証した。

1.2 論文の構成

本論文は全 4 章で構成する。第 2 章では、前半で本手法で利用するデバイスについての説明と、提案手法を用いたシステムの操作方法の説明をする。その後、後半でポイントベースを用いた素材モデルの構造と、力覚の提示方法と反力計算について説明する。第 3 章では提案手法を実装したシステムを使用してアンケートを行った結果を基に、粗彫りの作業工程がモデリングの操作にどの程度有用であ

るかを検証する。最後に第4章で本研究のまとめを述べる。

第 2 章

提案手法について

本章では、提案手法の概要と、内部処理について述べる。初めに 2.1 節で提案手法による CG モデリングの流れを説明する。2.2 節で各モデルの座標系の定義を述べた後、2.3 節、2.4 節でノミモデルとげんとうモデルの操作と処理の流れを説明する。2.5 節で素材モデルの描画方法について説明した後、2.6 節、2.7 節、2.8 節でモデリング操作に対する力覚提示の概要と、計算方法を説明する。

2.1 提案手法によるモデリングの手順

提案手法のモデリングの手順は、画面上のノミモデルと、げんとうモデルを、それぞれ Novint Falcon と Wii リモコンを使用して素材モデルに対し切削処理を行うことで形状を生成する。図 2.1 に提案手法のモデリングシステム操作の様子、図 2.2、図 2.3 にげんとうモデルとノミモデルを提示する。

操作の手順としては、3次元空間上のノミモデルを素材モデルの切削したい位置まで移動させる。ノミモデルと素材モデルが接触している状態で、ノミモデルをげんとうモデルで叩くと、ノミモデルと接触している部分だけ素材モデルの切削処理を行う。これを繰り返して素材モデルの形状を生成していく。素材モデルに切削処理を行う様子を、次の図 2.4 に提示する。

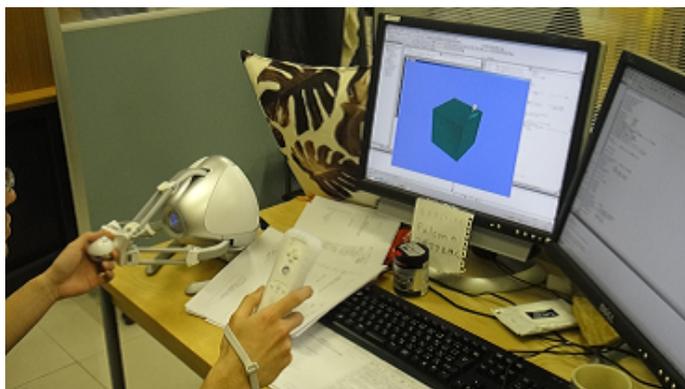


図 2.1: 提案手法を用いたモデリングシステムを操作している様子

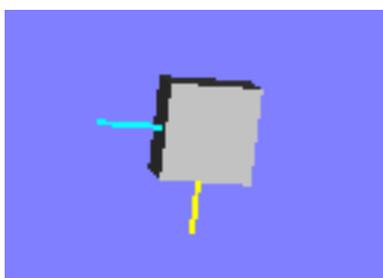


図 2.2: げんのうモデル



図 2.3: ノミモデル

2.2 各モデルの座標系

初めに、各オブジェクトモデルの座標系を定義する。本研究における 3D の座標系は右手座標系を採用しており、 z 軸の負方向を正面とし、 y 軸の正方向を上とする。グローバル座標系、カメラ、素材モデルのローカル座標系はこれにならう。また、ノミモデルは刃の方向を正面方向と考え、 y 軸の負方向を正面とする、ノミの上方向をを z 軸の負方向とする。げんのうモデルの座標軸もノミモデルと同じであり、初期の状態ではノミモデルとげんのうモデルは画面に対して下を向いた状態になる。

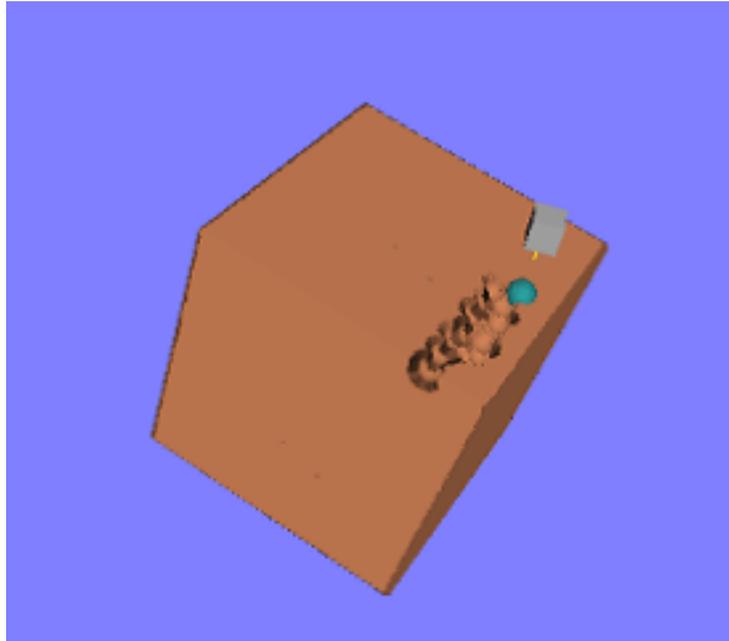


図 2.4: 素材モデルに切削処理を行う様子

2.3 げんとうモデルの操作

仮想空間上のげんとうモデルを振るには、Wii リモコンを使用する。Wii リモコンには、加速度センサー、赤外線センサー、12 個のボタン、振動機能が存在する。本研究においては、このうち Wii リモコンの加速度センサー、振動機能、十字ボタン、A ボタン、B ボタン、+ボタン、-ボタンを使用する。Wii リモコンの実装には、公開ライブラリである WiiYourself!^{[18][19]} を用いた。図 2.5 に Wii リモコンを提示する。

Wii リモコンは振ることによって立体的な操作が可能であり、少々激しい動きにも対応可能である。また、加速度センサーを持つデバイスの中でも安価で手に入りやすいため、研究やゲームコンテンツの開発でもよく用いる。加速度センサーは xyz 軸方向の 3 自由度の速度の検出が可能である。図 2.6 は加速度センサーの構造を示したものである。本手法においては、Wii リモコンの座標系は z 軸の正方向を上とし、 y 軸の負方向を正面とする。

仮想空間上のげんとうモデルは常にノミモデルの上部に位置し、Wii リモコン



図 2.5: Wii リモコン

の動きに合わせて移動する。げんとうモデルの位置ベクトルは、Wii リモコンを振らない限りノミモデルの位置座標から、ノミモデルの座標系における y 軸の正方向に一定間隔ずらした位置ベクトル \mathbf{B}_1 とする。また、げんとうモデルの正面方向は、常にノミモデルの正面方向と同じ向きとするため、げんとうモデルは常時ノミモデルの上部に位置し、ノミモデルの方を向いた状態になる。図 2.7、図 2.8 にノミモデルとげんとうモデルの位置と角度の関係を示した画像を提示する。げんとうモデルは正面方向にのみ移動するため、Wii リモコンを振るだけでノミモデルを叩くように操作することができる。

加速度センサーによってリモコンを振った際の実速度ベクトル \mathbf{S} を取得したとき、 \mathbf{S} の z 座標成分 S_z をげんとうモデルの移動する距離の長さとする。これにより、Wii リモコンを図 2.6 のように横に倒した状態で、Wii リモコンの座標系における z 軸方向に振ると、げんとうモデルが Wii リモコンの動きに合わせて直観的に動く。このとき、本手法ではげんとうモデルの座標系における高さを y 軸、それに対して Wii リモコンの座標軸における高さを z 軸としている。そのため、移動し

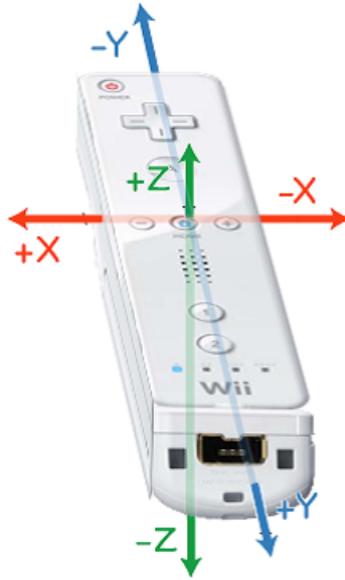


図 2.6: Wii リモコンの加速度センサーの構造

たげんのうモデルの位置ベクトル \mathbf{B}_2 は、 \mathbf{B}_1 の y 座標成分に S_z を加えて求める。これにより、Wii リモコンの振った際の力加減に合わせて、げんのうモデルが移動する。 \mathbf{B}_2 を次の数式 (2.1) で求める。

$$\mathbf{B}_2 = (B_x, B_y + S_z, B_z) \quad (2.1)$$

ここで B_x 、 B_y 、 B_z は、 \mathbf{B}_1 の各座標の成分とする。

Wii リモコンのプラスボタンとマイナスボタンを使い、ノミモデルの切削領域の大きさを変えることができる。大雑把に彫りたいときは切削領域を大きくし、細かく彫りたいときは小さくすることで、効率よく切削処理をすることが可能である。図 2.9 と図 2.10 に、ノミモデルの切削領域の大きさを変更した様子を示す。

また、カメラの操作も Wii リモコンによって行う。Wii リモコンの十字キーによって、素材モデルの中心点を注視点としたまま、素材モデルの中心点を中心に $\frac{\pi}{3} \text{rad/s}$ の速度で回転移動し、Wii リモコンの A、B ボタンでカメラ位置を前後に移動する。ノミモデルの傾きと合わせてカメラの操作を行うことで、素材モデルに対してあらゆる角度から切削処理を行うことが可能である。

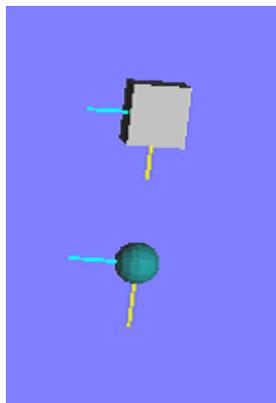


図 2.7: 下を向いた状態

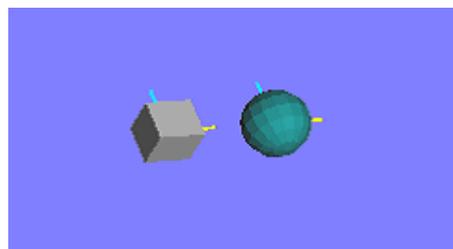


図 2.8: 右斜め奥方向を向いた状態

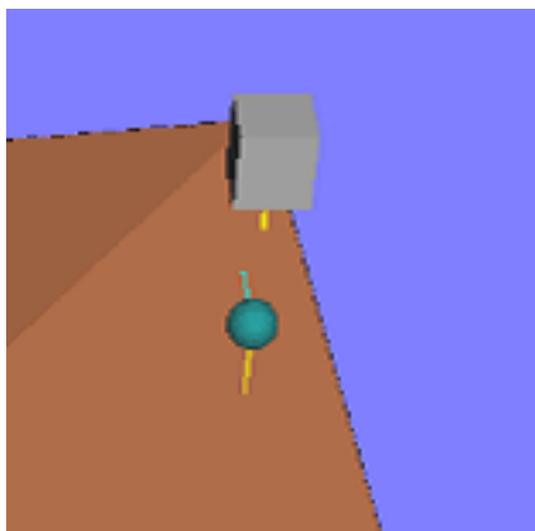


図 2.9: 切削領域を縮小



図 2.10: 切削領域を拡大

2.4 ノミモデルの操作

仮想空間上のノミモデルの操作は Novint Falcon で行う。Novint Falcon には、3本のアームに支えられているグリップと、グリップに存在する4つのボタンがある。Novint Falcon の実装には、Falcon SDK を用いてデバイスの制御を行った。図 2.11 に Novint Falcon を提示する。



図 2.11: 設置型力覚デバイス Novint Falcon

グリップは立体的な操作が可能であり、3次元空間の位置を取得することができる。また、グリップを支える3本のアームの抗力をそれぞれ調節することによって、硬いものや柔らかいものに触れたり、手に伝わる反動、衝撃など、様々な力覚・触覚を提示することができる。Novint Falcon は力覚提示が可能なデバイスの中でも、机の上など安定した場所の上に設置して用いるタイプのものである。3次元空間の位置が取得できる上に、力覚を提示することが可能であり、かつ設置するタイプのデバイスは身体に装着するようなものに比べると扱いやすいため、Novint Falcon を用いた研究が多くある。これを用いた研究の例としては、瀬田 [9] の手法や脇田ら [20] の手法がある。

画面上のノミモデルはグリップを動かすことによって位置操作を行い、ボタンによってノミモデルの傾き操作を行う。画面の視点方向に対してグリップを動か

し、グリップの位置ベクトル \mathbf{A} を取得し、これを新しいノミモデルの中心点として代入することでノミモデルの移動処理を行う。傾き操作は4つのグリップのボタンを使い、ノミモデルのローカル座標系の x 軸方向の回転と、 y 軸方向の回転を $\frac{\pi}{3}rad/s$ の速度で行う。

2.5 素材モデルの描画

本節では、本手法における粗彫りを施す対象となる素材モデルの描画方法を説明する。

粗彫りをする対象となる素材モデルは、ポイントベースレンダリングによるリアルタイムな形状変形を行う竹内ら [21] の手法を用いて描画、切削処理をする。素材モデルの内外情報を持つボリュームデータと、形状の表面を表す点群データの2つで構成する。ボリュームデータは形状内 (1) と形状外 (0) の2値を持ち、切削処理の際に更新する。点群データは、形状の表面を表す頂点の位置ベクトルと、その頂点における法線ベクトルの配列として定義し、初期形状の生成時と切削の際に生成、更新する。

本研究における素材モデルの初期形状は立方体を想定している。各面は頂点の位置ベクトルを基に配置し、大きさと頂点間の間隔が均一な点群の集合で表現しており、本手法においては256の3乗個の頂点数で木材を描画している。図2.12は、モデルを構成する点群のイメージ図である。各点を描画するにあたり、画面上での大きさを視点となるカメラの距離に反比例するように変化することで、頂点間の空白を疑似的に補間して描画を行う。

2.6 触覚・力覚提示の手法

本手法では、ノミモデルが素材モデルに接触した際に発生する反力と、ノミモデルを叩いた際にノミが押し込まれる力をノミモデル側のデバイスで提示する。更にこれらと同時にげんとうモデル側のデバイスを振動させることで、ノミモデル

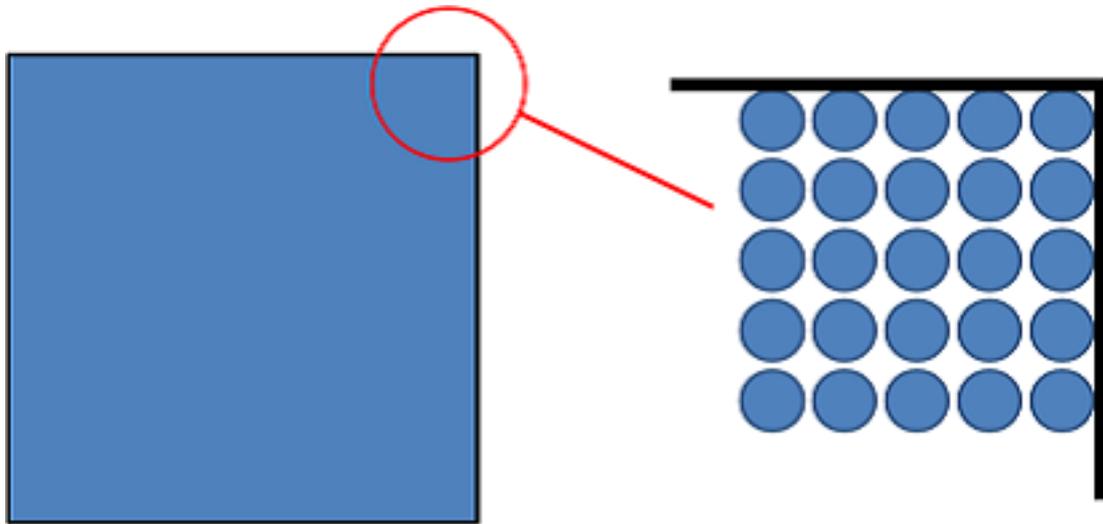


図 2.12: 立方体を形成する点群の集合

を叩いた感触を表現する。この処理を、ノミモデルが2.5で述べた形状内の値を持つボリュームデータの領域と接触した際と、げんとうモデルと接触した際に行うことで、視覚的に接触したことを認知すると同時に力覚を提示することを可能とした。反力の計算方法については2.7節、2.8で述べる。

2.7 素材を削る際の反力の計算方法

物体に力が加わった時、その運動エネルギーは物体に働く力と、物体に対する反力に分かれるため、反力は物体に加えた力より小さくなる。また、反力は力が加わった部分の面に対して垂直方向に働く。本手法においては、素材とノミモデルが接触した際の反力の計算を次の式(2.2)で求める。

$$\mathbf{F} = -k\mathbf{x} \quad (2.2)$$

ここで、 \mathbf{x} は力を加えた物体が接触した位置から移動した量と方向を表したベクトルとする。 k は、力覚デバイスの種類によって同じ値でも提示される反力が異なるため、本手法で用いている Novint Falcon に合わせて、反力に補正をかけるた

めの値である。本手法では力を加えられる物体は全て剛体としているため、 k は使用する力覚デバイスに合わせて、ほぼ剛体と感じられる任意の値を調査して代入することで、疑似的に剛体の感触を提示している。

ノミモデルが素材モデルと接触した際の反力 \mathbf{F}_1 を求める。 \mathbf{F}_1 は、物体にかかる力のうち、ノミモデルと接触した素材モデルの面の垂直方向に働いている分の力に、素材モデルの硬さを加味してノミモデルに返したものとする。反力の方
向ベクトルとして、ノミモデルが接触している素材モデルの面の法線ベクトル \mathbf{N} を取得する。ノミモデルが素材に削り込む量と方向を表すベクトル \mathbf{X} を取得し、 $-\mathbf{N}$ との内積を求め、これを (2.2) の x に代入する。 $-\mathbf{N}$ と \mathbf{X} のなす角を θ としたとき、 \mathbf{F}_1 は次の数式で求める。

$$\mathbf{F}_1 = |\mathbf{X}| \mathbf{N} k \cos \theta \quad (2.3)$$

ノミモデルと素材モデルが接触した際に働く力を図 (2.13) で示す。

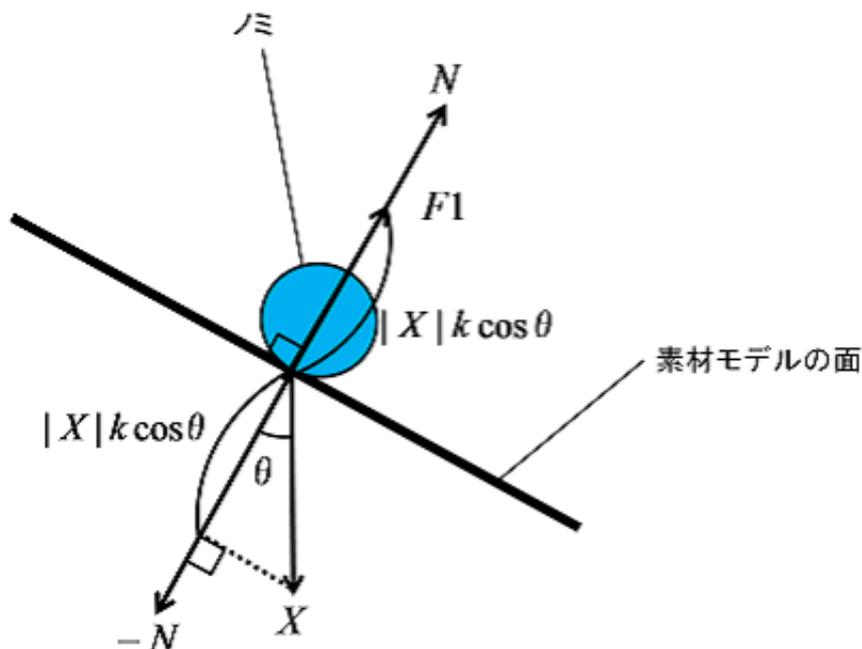


図 2.13: ノミモデルと素材モデルが接触した際の反力

2.8 ノミモデルをげんとうモデルで叩いた際の力の計算方法

げんとうモデルでノミモデルを叩いた場合は、ノミにかかる力 F_2 を求める。まず、 B_2 から B_1 を引いて、げんとうモデルが移動する長さとお方向を表すベクトル X_2 を取得する。次の数式 (2.4) で X_2 を求める。

$$X_2 = B_2 - B_1 \quad (2.4)$$

本手法においてげんとうモデルは必ずノミモデルに対して垂直に動くため、ノミモデルにかかる力は打面から垂直方向に働くと考える。そこで、力の方向としてノミモデルの刃の方向ベクトル N_2 を取得する。げんとうモデルでノミモデルを叩いた場合の反力を、次の数式 (2.5) で求める。

$$F_2 = |X_2| N_2 \quad (2.5)$$

げんとうモデルでノミモデルを叩いた際に、ノミモデルに働く力を図 (2.14) で示す。

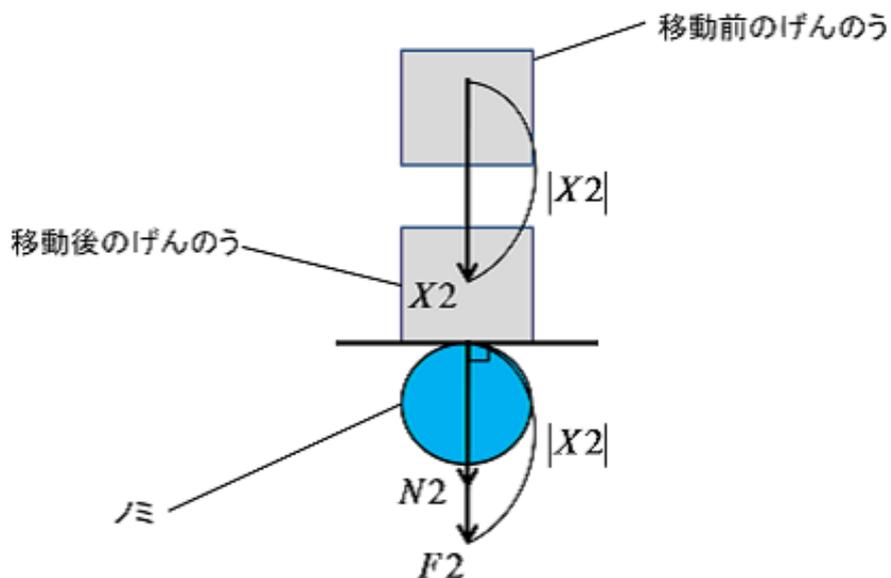


図 2.14: ノミモデルを叩いた際に発生する力

これらを Novint Falcon のアームの抗力として入力することで、ノミモデルにかかる力を力覚として感じる事が可能である。また、げんとうモデルでノミモデルを叩いた際には Wii リモコンを振動させることで、げんとうモデルを操作する手に疑似的に叩いている感触を提示している。なお、本手法では素材モデル、ノミモデル、げんとうモデルにおける材質、接触した際の摩擦、重力が触覚・力覚に与える影響は考慮していない。

第 3 章

提案手法の評価実験

3.1 検証方法

本研究では第 2 章述べたノミの切削工程を用いたモデリングシステムを試作した。それを用いてユーザテストを行い、提案手法を用いたモデリング手法の有用性を検証した。モデリングシステムのプログラムの実装には、3DCG ツールキットの Fine Kernel ToolKit[22] を使用した。検証をする際には、CG 制作の経験がなくても十分に操作ができるか、ユーザが意図した通りの形状が生成できるかという点に注目した。

3.2 ユーザテストの対象

ユーザテストは 19 名行った。そのうち CG 制作の初心者が 12 名、経験者が 7 名である。なお、今回の検証ではモデリングシステムを使用した CG 制作の経験が全くない者、あるいは講義などで軽くモデリングシステムに触れたことがあるだけの者を初心者とした。また、モデリングシステムを使用し、プライベートで CG モデルを制作したことがある人を経験者とした。検証の内容は、被験者が提案手法と、既存のモデリングシステムの代表例として Metasequoia[23] を使い、目的の形状のモデリングを制作する。被験者の CG 制作の経験を考慮し、両者を用いたモデリングの結果を比較することで提案手法の特徴を検討した。

3.3 ユーザテストの手順

ユーザテストの流れは、まず、被験者も制作する形状の具体例を載せた画像を見せる。画像は提案手法を用いてモデリングしたものをキャプチャしたものであり、例となるモデルを正面、横、上、斜め下から見た画像を一通り見せた。次の図3.1、図3.2に、ユーザに形成する目的の形状として見せた画像の一部を提示する。

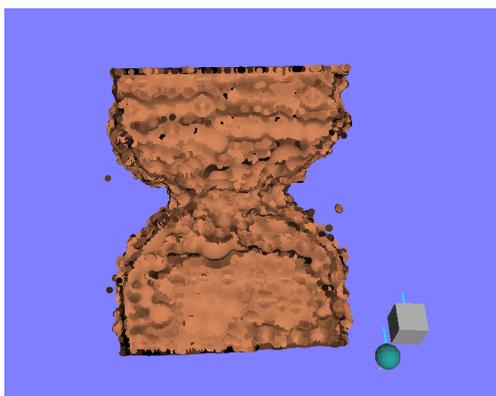


図 3.1: 正面から見た形状

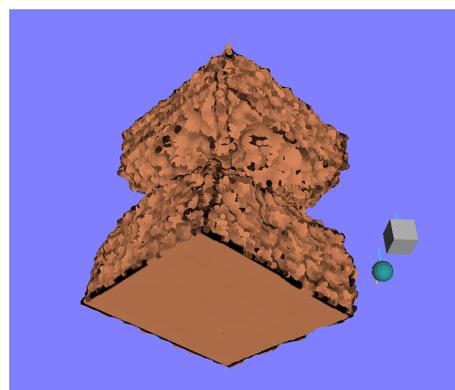


図 3.2: 斜め下から見た形状

この砂時計型の形状は、提案手法を用いて図3.3に示すモデルを、テクスチャに描画された輪郭線に沿って切削したものである。立方体の側面を彫り、中心がくびれるように四方からくり抜いて作成した。提案手法を用いるときは、被験者もこのモデルに対してモデリングを行う。

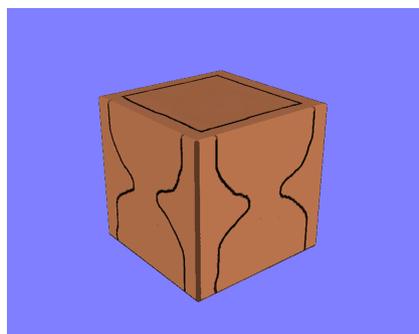


図 3.3: 形状の輪郭を描画したモデル

初めに提案手法を用いてモデリングを行った。モデリングを行う前に本手法に

おける操作説明を行い、後は操作の練習はせずにモデリングを始める。被験者は目的の形状となる画像を見ながら、その形状通りになるようにモデリングを行う。被験者が完成したと判断するか、途中でモデリングを断念した時点で操作を終了し、制作開始から終了までの時間を計測した。

次に、Metasequoia を用いてモデリングを行う。被験者は一部機能が制限されている入門モードを使い、初めにこの状態で使用できる機能について一通りの説明を行った。こちらでも提案手法で制作したものと同一形状を制作するが、完成形にばらつきが出ないように、上下から見て正方形になり、中心が丸くくびれるようにすることを完成の最低条件とした。こちらも提案手法と同じ条件で操作を終了し、制作開始から終了までの時間を計測した。その後、被験者はアンケートを行い、両方のモデリングシステムについて次のことを4段階で評価してもらった。

- 操作は分かりやすかったか
- 意図した通りの形に作れたか

また、この質問に対して、どちらの方がよりそう感じたかどうかを評価してもらった。これらの質問の答えと制作時間の結果から、CG制作の初心者にとって提案手法を用いたモデリングシステムの操作はわかりやすいかどうか、意図した通りの形状を作れるかどうかを検証した。この他に、提案手法での力覚提示について次のことを質問し、4段階で評価してもらった。

- ノミを叩く感触はあったか
- 彫る感触はあったか
- 力覚の提示がモデリングをする上で役に立ったか

これらの評価から、提案手法における力覚の提示がモデリングにどのように影響しているのかについても、検証を行った。

3.4 制作時間の結果と比較検証

最終的な結果として、両方のモデリングシステムについて19名全員が途中でやめることなく最後まで制作を行い、形状を完成させることができた。まず、制作時間の比較検証について述べる。提案手法と Metasequoia の平均制作時間、最も多くかかった時間と最も短かった時間について、初心者と経験者別に分けた結果を表3.1と表3.2に示す。

表 3.1: CG 制作初心者の制作時間

	提案手法	Metasequoia
平均制作時間	37分	17分
最長時間	1時間23分	51分
最短時間	22分	6分

表 3.2: CG 制作経験者の制作時間

	提案手法	Metasequoia
平均制作時間	36分	6分
最長時間	52分	7分
最短時間	24分	3分

提案手法を用いた場合の平均制作時間と最短時間は、初心者も経験者もほぼ同じであった。それに対して Metasequoia の制作時間は、経験者の方が全体的に短く、全員10分以内に制作を終えた結果となった。提案手法における制作時間は、初心者と経験者ともに個人差が大きく表れた。Metasequoia の場合、初心者は大きな差が現れ、経験者はほぼ同じ時間で制作した。また、初心者も経験者も、比較すると Metasequoia の方が早い時間で目的のモデルを作成した。

3.5 操作と形状生成についての結果と比較検証

操作のわかりやすさと、意図した通りの形状が作れたかどうかについて、両方のモデリングシステムについて0から3の4段階の評価をしてもらった。0に近い

ほど評価が悪く、3に近いほど評価が良いとする。それらの評価の結果を、次の図3.4、図3.5に示す。

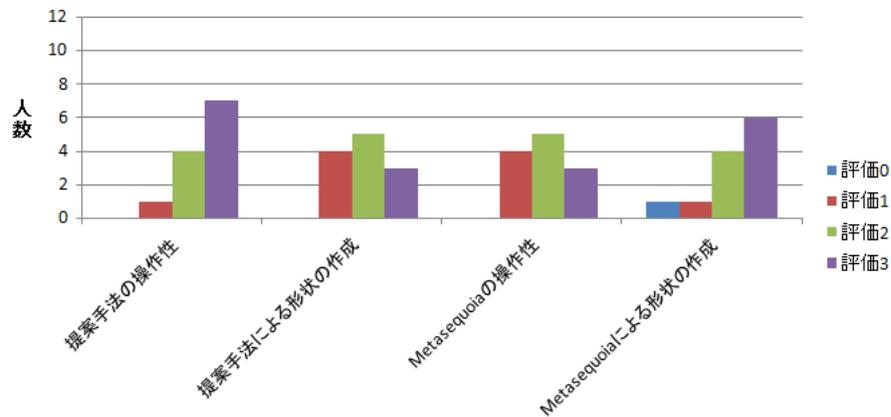


図 3.4: モデリングシステムに対する初心者の評価

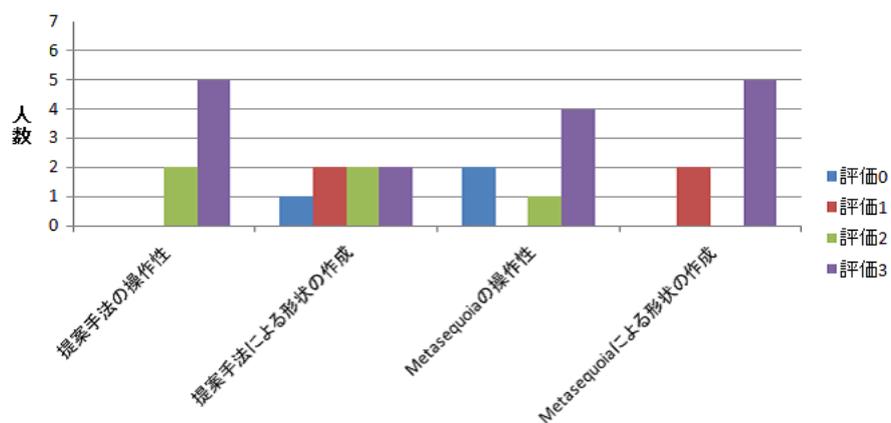


図 3.5: モデリングシステムに対する経験者の評価

提案手法において、操作のわかりやすさは初心者と経験者ともに3の評価が最も多く、半分以上が2以上の評価をした。また、意図した通りの形状が生成できたかという評価について、初心者は操作性に比べると3の評価が少ないが、半分以上2以上の評価をしている。経験者は各段階でほぼ均等にばらけた評価となった。Metasequoiaにおいては、操作のわかりやすさは初心者の半分以上が2以上の評価をしており、経験者のほとんどが3の評価であった。意図した通りの形状が生成

できたかについては、初心者、経験者とも高い評価をしており、提案手法よりも高い評価の数が多かった。

また、操作性と形状の作成について、どちらの手法の方が良かったかという質問をした。この質問も0から3の4段階の評価をするが、0に近いほど Metasequoiaの方がよく、3に近いほど提案手法の方がよいという回答形式にした。これを初心者と経験者別にまとめたところ、図 3.6、図 3.7 のような結果となった。

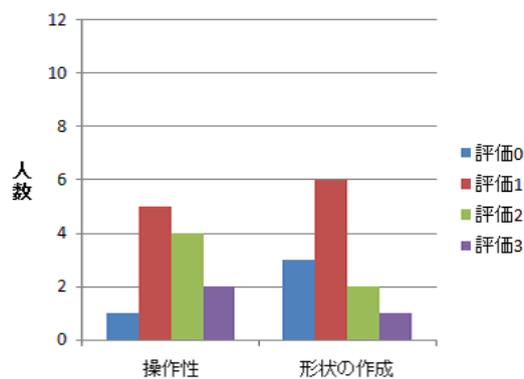


図 3.6: どちらの方が良かったかについて初心者の評価

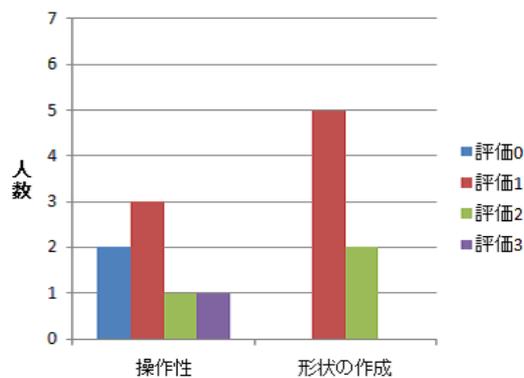


図 3.7: どちらの方が良かったかについて経験者の評価

初心者の評価をみると、操作性は両手法とも半分ずつ別れた評価になり、形状の形成については Metasequoia の方が意図した通りの形状を作れるという傾向があるが、ほぼ同じ段階の評価であることがわかる。また、経験者は操作性、形状の作成ともに Metasequoia の方を評価している傾向がある。

3.6 力覚提示の結果と検証

提案手法に用いた力覚提示について、ノミを叩く感触はあったか、彫るような感触はあったか、力覚の提示がモデリングをする上で役に立ったかという質問をした。これらを0から3の4段階で評価してもらったものを、図3.8、図3.9に示す。

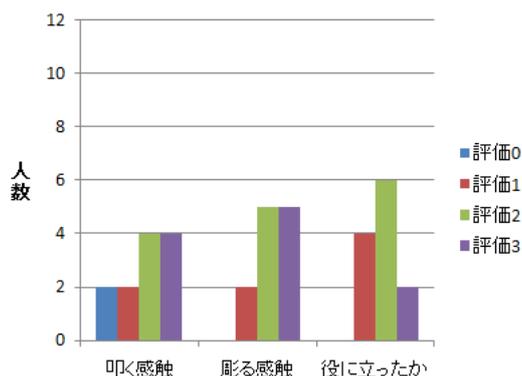


図 3.8: 力覚提示について初心者の評価

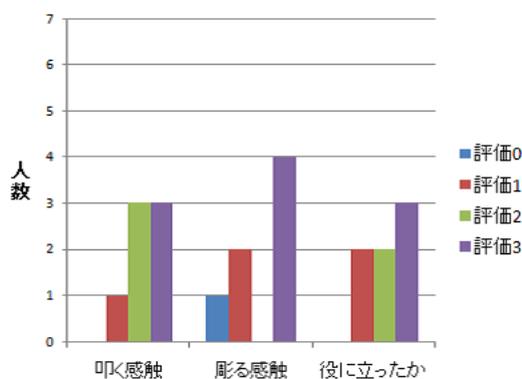


図 3.9: 力覚提示について経験者の評価

初心者、経験者とも、ノミを叩いたり、素材を彫ったりする感触がしたかということについては、半分以上の人が2以上の評価をしており、高い評価が多かった。そのような力覚の提示が、モデリングをする上で役に立ったかということについても、初心者と経験者ともに全体的に高い評価をしているという結果になった。

3.7 考察と今後の展望

本節では、ユーザテストの結果と、ユーザから得られた意見についての考察を述べ、考察の内容とユーザの意見を基に今後の展望を述べる。操作のわかりやすさと意図した通りの形状を制作できたかということに注目した時、提案手法の操作のわかりやすさは初心者、経験者ともに高い評価を得られた。操作については、彫る位置を直観的に操作できたのでわかりやすかったという意見を被験者から得られた。また、意図した通りの形状が制作できたかについては、初心者からは操作のわかりやすさ程ではないが、半分以上が高い評価をしている傾向がある。このことから、提案手法を用いたモデリングシステムは、CG制作の初心者にとってある程度操作がわかりやすく、意図した通りの形状を制作できるということが言える。

また、初心者、経験者ともに半数以上が、ノミを叩く感触と素材を彫る感触がしているという評価をし、これらの力覚提示がモデリングをする上で役に立ったという評価を得られた。これについてユーザの意見として、操作に手応えがあることで、削れているかどうかははっきりわかったことが何人かから理由として上げられた。力覚提示をすることで、視覚だけで形状変形を認知するよりもはっきりと、削れていることをユーザが理解することができるかと推測できる。Metasequoiaと比較した場合、操作のわかりやすさについては初心者からほぼ同等の評価を得られたことから、既存のモデリングシステムに劣らない操作のわかりやすさを実現できたと言える。

制作時間を見た場合、初心者と経験者はほぼ同じ制作時間であったことから、提案手法による制作時間については、CG制作の経験の有無はほとんど関係がないと推測できる。また、提案手法における制作時間は、初心者と経験者ともに個人差が大きく表れた。比較的彫りすぎ、表面の凹凸、彫り残してしまった点群などを、あまり気にせず大雑把に彫る人は短い時間で仕上げ、逆にそれらを気にして細かく慎重に彫る人は時間をかけて制作していたことが原因だと推測できる。Metasequoia

の場合、初心者は大きな差が現れ、経験者はほぼ同じ時間で制作した。形状を生成するためにどのような機能を使えばよいのか、ある程度の見当がついた人は制作時間が比較的短かった。対してどのように制作してよいのかわからず、そもそもどのような機能があるのか把握できていない人は時間がかかる傾向があった。このことから、モデリングシステムにおける基本的な機能や操作の仕方を知らない場合、Metasequoia は時間がかかってしまうと推測できる。

しかし、両手法を比較すると、意図した形状の作りやすさについては Metasequoia の方が高い評価をした人が多かった。画面奥行き方向の距離感が分かりづらい、カメラの位置を移動することができない、Novint Falcon からの反動で逆に手がぶれてしまうという意見があったことから、彫る位置を定めにくかったためだと推測できる。また、Metasequoia は整った形状を制作しやすいことに対し、提案手法は球体で彫るに加え、ユーザは手の動きで位置を微調整しなければならない。その上、今回のユーザテストで用いたものは、一度彫ってしまった形状を修正する機能がない。そのため、表面に凹凸がついてしまったり、形状がいびつになりがちになってしまうことも、このような評価になった要因であると考えられる。

また、制作時間を見た場合、初心者と経験者ともに Metasequoia の方が短い時間で制作している。多くの場合初めに直方体を作り、少しずつ中心をしぼませてくびれを出すという工程で制作していた。Metasequoia は制作目標とした形状を幾何学的な形状を少し派生させただけで作れてしまうものであり、対して提案手法は球体で一定の領域で切削していくしかなかったためだと考えられる。

今後の展望として、ユーザが意図した通りの形状を更に制作しやすくすることが挙げられる。提案手法を用いて十分に意図した通りの形状を制作するためには、ユーザビリティの改善が必要であると考えられる。グリッド線を表示したり、カメラの位置を操作できるようにすることで、空間位置を把握しやすくする。操作のやり直しができるようにしたり、彫った部分を埋めて形状を盛ることができるようにすることで、修正ができるようにする。また、平たい形状の切削領域を用いることで、平らな表面を制作できるようにすることも可能である。これらを実

装することで、提案手法を用いたモデリングシステムにおけるユーザビリティの改善が期待できる。

第 4 章

まとめ

本論文の総括を述べる。本研究では、既存のモデリングシステムがCG制作の経験や専門知識を持たない人にとって手を出しにくいという問題に着目し、現実の形状生成方法を用いることで初心者でも扱いやすいモデリング環境が提案できると推測した。そこで、工程がイメージしやすく、形状生成に強い印象を受けるノミの切削工程を基にしたモデリングシステムを提案した。Novint Falcon と Wii リモコンを操作デバイスとして用いたことで、実際にノミとげんのうを使うような操作方法を実現し、Novint Falcon のアームの抗力を調整することでノミを叩いたり、素材を削るような力覚を提示した。また、素材モデルの構成にポイントベース法を用いたことによって、切削処理に対するリアルタイムな形状変形を実現した。

本研究で提案した手法を用いたモデリングシステムと、既存のモデリングシステムの代表例として Metasequoia を使ってユーザテストを行い、提案手法がCG制作の初心者にとって操作が分かりやすいか、意図した通りの形状が生成できるかどうかを検証した。検証の結果、提案手法は直観的にノミやげんのうを操作して彫ることができるため、初心者にとって操作がわかりやすく、ある程度意図した形状を制作できるという評価を得ることができた。しかし、提案手法は彫る位置を定めにくく、更に修正ができないために形状がいびつになってしまうことから、Metasequoiaの方が意図した形状を制作しやすいという傾向があった。また、Metasequoiaは基本形状を少し派生させて制作できてしまうことに対し、提案手法

は一定の領域で少しずつ彫るしかないため、制作時間がかかってしまうことがわかった。

本研究では、初めの推測と異なり、既存のモデリングシステムと比べると、必ずしも意図した通りの形状が制作できるわけではなかった。しかし、提案手法自体の操作性や形状の生成については初心者、経験者ともに高い評価を得ることができた。今後の展望として、位置関係と空間把握をしやすくしたり、モデリングした形状の修正が出来るようにするなど、ユーザビリティを改善をすることが考えられる。また、平たい形状で切削できるようにすることで、整った表面を制作できると考えられる。これらを実装することで、ユーザの意図する形状を更に作りやすくすることが期待できる。

謝辞

本研究を締めくくるにあたり、終始温かいご指導ならびに適切な助言をくださいました、本校メディア学部三上浩司講師と渡辺大地講師には、大変お世話になりました。また、毎回期限の限界までお待たせしてしまい、度々ご心配とご迷惑をおかけしてしまったことを深くお詫び致します。実装を行う上で様々な技術提供、アドバイスを頂いた竹内亮太さんには、心からの感謝の意を表します。最後に、ユーザテストや問題に対する助言をいただき、時には励ましていただきながら苦楽を共にし、歩んできた研究室の院生の方々、研究室のメンバーにも、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Olga A. Karpenko, John F. Huges, “Smoothsketch: 3d free-form shapes from complex sketches,” *Processings of ACM SIGGRAPH 2006* , 589–598 (2006).
- [2] ZBrushCentral, “Sculptris.”
<http://www.zbrushcentral.com/showthread.php?t=090617>.
- [3] Takeo Igarashi, Satoshi Matsuoka, Hidehiko Tanaka, “Teddy: A sketching interface for 3d freedom design,” *Proceedings of ACM SIGGRAPH 99* , 409–416 (1999).
- [4] 大和田 茂, 赤保谷 鮎美, Frank Nielsen, 楠 房子, 五十嵐 健夫, “切る,” **第 12 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2004)** , 1–4 (2004).
- [5] 荒田 秀樹, 高井 昌彰, 高井 那美, 山本 強, “仮想粘土による 3 次元形状モデリング,” **情報処理学会研究報告グラフィックスと CAD 研究会報告 98(94)** , 19–24 (1998).
- [6] 小林 大吾, 水野 慎士, 岡田 稔, 鳥脇純一郎, 山本 眞司, “筆圧に基づく捜査の強さを考慮した仮想彫刻・版画システム,” **インタラクシオン 2005** (2005).
- [7] 今泉 仁美, “Igel ～ヒートカッターを模した 3 次元形状モデリング～,” **芸術科学会論文誌**, Vol. 8, No. 2 , 43–50 (2009).

- [8] 櫛田 英功, 金 時学, 石井 雅博, 小池 康晴, 佐藤 誠, “ガラス細工メタファーによる自由形状モデリング手法,” **情報処理学会研究報告 グラフィクスと CAD 研究会報告**, 31–36 (feb 2000).
- [9] 瀬田 陽平, “3次元入力デバイスを用いたガラス細工体験システムの研究,” **東京工科大学 メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト 2008年度学部卒業論文** (2008).
- [10] 蛭田 宏明, 武田 正之, “仮想彫刻における6軸モーションセンサを用いた切削手法,” **第9回情報科学技術フォーラム (FIT2010)** (2010).
- [11] 任天堂株式会社, “Wii リモコン.”
http://www.nintendo.co.jp/wii/features/wii_remote.html.
- [12] 建畠 覚造, 尾川 宏, 舟越 保武, 佐藤 忠良, 植木 茂, 井上 武吉, [**新・技法シリーズ 彫刻をつくる**], 美術出版社, 12 ed. (1976).
- [13] 徳永 修一, 白田 智大, “仮想彫刻システムのための空間位置センサーの試作,” **詫間電波工業高等専門学校研究概要 第35号** (2007).
- [14] 徳永 修一, 中谷 彰吾, 白田 智大, “仮想彫刻システムのための彫刻材料の位置測定法に関する研究,” **詫間電波工業高等専門学校研究概要 第36号** (2008).
- [15] SensAble Technologis, “Phantom premium 6dof.”
<http://www.sensable.com/haptic-phantom-premium-6dof.htm/>.
- [16] Makoto Sato, “Development of string-based force display: Spidar,” *VSMM2002(The Eighth International Conference on Virtual Systems and Multi Media)*, 1034–1039 (2002).
- [17] NOVINT, “Novint falcon.”
http://home.novint.com/products/novint_falcon.php.

- [18] gl.tter, “Wiiyourself!”
<http://wiiyourself.gl.tter.org/>.
- [19] 白井 暁彦, 小坂 崇之, くるくる研究室, 木村 秀敬, [*WiiRemote* **プログラミング**], オーム社 (2009).
- [20] 脇田 航, 井上 研二, 井門 俊, “テクスチャベースの触・力覚モデリングシステムの開発,” **電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム J91-D(12)**, 2773–2780 (2008).
- [21] 竹内 亮太, 渡辺 大地, “異なる物質の特性を表現した点群形状モデリング手法の提案,” **情報処理学会研究報告, グラフィクスと CAD 研究会報告 Vol.2008(No.80)**, 23–28 (2008).
- [22] 渡辺 大地, “Fk tool kit system.”
<http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.
- [23] O.Mizno, “Metasequoia.”
<http://www.metaseq.net/>.