

修士論文

変形VRコントローラによる
知覚モデルに基づいた物体形状の提示に関する
研究

令和元年度

指導教員 廣瀬通孝教授

東京大学大学院学際情報学府 先端表現情報学
コース
49-176312 茂山 丈太郎

目 次

第 1 章 序論	7
1.1 本研究の背景	8
1.2 研究の目的	9
1.3 本論文の構成	10
第 2 章 関連研究	11
2.1 触覚に関する研究	12
2.1.1 手と触知覚	12
2.1.2 手による物体の形状知覚	13
2.1.3 把持物体の形状知覚:Dynamic Touch	14
2.2 VR における触覚フィードバック技術	17
2.2.1 VR のための触力覚デバイス	17
2.2.2 重量・重心移動型デバイス	19
2.2.3 手持ち型 VR 入力インターフェース	21
2.3 多感覚統合を用いた触覚インターフェース	22
2.3.1 視触覚インターフェース	23
2.4 知覚・認知の数理モデルとその応用インターフェース	25
2.4.1 視覚と触覚の統合を例とした知覚の数理モデル	26
2.4.2 データドリブンな手法による知覚・認知の数理モデル	29
2.5 本章のまとめ	32
第 3 章 Transcalibur:重量分布変化による形状提示 VR コントローラ型デバイス	33
3.1 Transcalibur の概要	34
3.1.1 Angular Mechanism	35
3.1.2 Weight Shifting Mechanism	36
3.1.3 Transcalibur の制御	36
3.2 予備評価実験・インタラクティブデモ	38
3.2.1 予備評価実験	38
3.2.2 インタラクティブデモ	42
3.3 本章のまとめ	45

第4章 静的2次元物体の計算機的知覚モデルの実験	47
4.1 実験の目的	48
4.1.1 データ収集実験の目的	49
4.1.2 モデル評価実験の目的	50
4.2 実験1:データ収集実験	50
4.2.1 実験のシステム構成	50
4.2.2 調整法による重量分布-VR形状のデータ対収集タスク	52
4.2.3 実験の手順	53
4.2.4 収集データの後処理	53
4.3 知覚モデルの構築	53
4.3.1 知覚モデルの定義と学習	53
4.3.2 モデルの線形回帰による知覚形状の推論	54
4.4 実験2:モデル評価実験	55
4.4.1 形状提示可能範囲の可視化	55
4.4.2 計算機的知覚モデルによる形状識別率の測定実験	55
4.5 本章のまとめ	59
第5章 動的2次元物体の計算機的知覚モデルの実験	60
5.1 実験の目的	61
5.1.1 データ収集実験の目的	62
5.1.2 モデル評価実験の目的	62
5.2 実験1:データ収集実験	63
5.2.1 実験のシステム構成	63
5.2.2 現実空間の構成	63
5.2.3 2AFC法による違和感生起率測定タスク	65
5.2.4 実験手順	66
5.3 知覚モデルの構築	66
5.3.1 知覚モデルの従属変数	67
5.3.2 知覚モデル:違和感生起確率関数の定義	67
5.3.3 パラメータ分布の予測と上弁別閾の算出	68

5.4 実験 2: モデル評価実験	69
5.4.1 実験のシステム構成	70
5.4.2 現実空間の構成	70
5.4.3 実験手順	71
5.4.4 実験 2 の結果・考察	73
5.5 本章のまとめ	75
第 6 章 結論	77
6.1 本研究の成果	78
6.1.1 本研究の貢献	78
6.2 本研究の課題	78
6.2.1 ハードウェアの制約	78
6.2.2 様々なマテリアルへの対応	79
6.2.3 データ収集量とユーザ負荷のトレードオフ	79
6.3 今後の展望	79
6.3.1 3 次元形状の形状提示	79
6.3.2 様々な物理特性の形状提示	79
6.3.3 データ収集と知覚推定のフレームワーク	80
6.3.4 Computational Interaction・Virtual Reality と視触覚インタラクション	81
第 7 章 本研究の成果	84
7.1 本研究の成果	85
7.1.1 学会論文	85
7.1.2 デモ展示	85
7.1.3 ポスター展示	85
7.1.4 主な紹介記事	86
謝辞	88
参考文献	90

付 錄 A 実装に使用した周辺機器・アンケート	99
A.1 Unity	100
A.2 VIVE Pro	100
A.3 pymc	100
A.4 Google Forms	100

第1章

序論

1.1 本研究の背景

コンピュータの計算能力の進歩や、ディスプレイの高解像度化に伴う昨今のバーチャルリアリティ(VR)技術の急激な発達によって、VRを誰でも、どこでも体験できる時代が到来した。外部PCなどを必要としないモバイルVR端末の登場により、VRの体験人口は急速に増大し、あらゆるデジタルコンテンツが平面のスクリーンからインタラクティブなVR空間を軸にしたものとなる日も近い。特に、Oculus Quest [1]を始めとした6DoF(自由度)トラッキングのモバイルVRの実現により、ある場所に歩いてVRオブジェクトまで向かい、両手を用いて自由にインタラクションするというデジタルコンテンツが広く提供できるようになった。

このような背景から、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を介して見ることのできるバーチャル物体を操作する際に、それを実際に触っているかのように感じさせることのできる触覚ディスプレイ技術に関する研究にかねてより注目が集まっている。手指にリンク機構を用いて力覚を提示するもの[2-4]、振動モーター[5]や超音波刺激[6,7]によって皮膚表面に触刺激を与えるもの、EMS[8]を用いて電気的に筋肉を刺激するものなどが提案されてきた。

特に6自由度のヘッドトラッキング・ハンドトラッキング環境下では、VR空間内を動き回りながら様々なオブジェクトを触る-動かすといった、ユーザの能動的なVRインタラクションが重視され、その際にユーザが実際に物体を持って動かした感覚をよりリアルに提示することが重要となる。とりわけ、物体の重量や形状に関する知覚は、様々な手の動きの中でも唯一、手全体の動きを伴ったものによって感じられるものであることが知られている[9]。

よって、物体と触れた際の触力覚やテクスチャ感覚のみならず、物体を持って動かした際に感じる重量感や形状知覚に注目した研究も提案されている[10,11]。Turvey et al.は、物体形状知覚が物体の慣性モーメントの主成分によって変化することを“Dynamic Touch”として定量的に示した[12]。VR空間内でも、Zennerらによる一本の棒状のアーム上を重りが動く機構によって物体の長さ知覚を提示する手法が提案されている。

これまでの認知心理学の知見やVR研究の結果から、形状知覚は視覚が触覚に大きく影響を及ぼす場合があることが示されている。Size Weight Illusionなどは物体

を把持した際の重量感覚が物体の大きさによって影響を受ける現象として知られている [13]. このような視覚による触覚への影響を応用した例として, Zenner et al. の研究では, 一次元のアーム上の重りを動かすだけで, 長さのみならず物体の太さや重さ感覚も変調させられることを示している [14]. また Fujinawa et al. は, 視覚による影響を考慮した上で重量分布やサイズを最適化する VR コントローラのファブリケーション手法を提案している. しかしながら, 先行研究では単一のコントローラで, 動的にかつ高さや幅・非対称な物体や変形といった様々なエフェクトを考慮しておらず, 提示できる物体形状に限りがあるという問題があった.

本研究では, 2つの回転するアーム上を動く重りによって2次元平面上の重量分布を変えることで, 様々な物体の幅や高さなどのVR物体を持った感覚を得られる手持ち型VRコントローラ: Transcaliburを提案する. さらに, Transcaliburによる触覚刺激とVR空間内の視覚刺激と組み合わせることで, 多様な形状の物体を把持した感覚を得られるように, データドリブンな手法で複雑な視触覚相作用の知覚モデルを扱いやすいように構築し, 最適なTranscaliburの重りの位置や角度を求められるようにする. また, アニメーションなどと組み合わせた際に, Transcaliburを少しだけ変形させただけでも, 違和感のない形状変形を提示できるパラメータを求める手法を検討する.



図 1.1: Transcalibur は, 様々な VR 形状を提示できる変形 VR コントローラである.

1.2 研究の目的

本研究では, VR 物体の把持感覚を提示できる, 計算機的知覚モデルをベースとした VR コントローラ型触覚提示システム : Transcalibur の構築と, その性能評価を目的とする. 手に持った物体の形状知覚が視覚に影響を受ける複雑な錯覚現象を

扱うために、多数のデータ対を収集するデータドリブンな手法でコントローラの状態とVR空間内での形状の対応付けを行い、知覚モデルに基づいて提示したい形状に最適なTranscaliburの重りの位置パラメータを与えるシステムを構築、評価する。また、伸びる・縮むなどのアニメーションなど、動的に変形するVR形状を違和感なく提示するために、アニメーションに合わせて変形するTranscaliburの変形量を少なくするよう最適化するシステムを構築、評価する。

1.3 本論文の構成

本論文は全6章から構成される。以下に各章の概要を述べる。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的、および本論文の構成を述べた。

第2章「関連研究」では、本研究に関する触覚提示技術と把持物体の形状知覚メカニズムについて述べる。また、知覚のモデリングとその応用に関する先行研究についても述べる。

第3章「Transcalibur：重量分布変化による形状提示VRコントローラ型デバイス」では、実際に実験で用いたTranscaliburのプロトタイプや機構、また予備実験について述べる。また、制作したデモ展示による定性評価の結果について述べる。

第4章「静的2次元物体の計算機的知覚モデルの実験」では、Transcaliburによって様々な2次元物体を提示するための知覚モデルを構築する手法、およびその評価実験について述べる。

第5章「動的2次元物体の計算機的知覚モデルの実験」では、動的に変形するVR形状を違和感なく提示するために、Transcaliburの変形量を少なくするために最適化するシステムを構築する手法、およびその評価実験について述べる。

第6章「結論」では、本研究についての結論と今後の展望について述べる。

第2章

関連研究

本章では、触力覚・形状知覚、VR技術における触覚提示技術・および知覚モデルをベースとしたフィードバックシステムや、知覚モデル構築の先行事例について述べる。第2.1節では、手の触覚知覚・把持物体の触覚知覚について、知覚心理学分野での先行研究を述べる。第2.2節では、VR環境における触覚の重要性を踏まえ、VR触覚提示ディスプレイの関連技術について述べる。第2.3節では、触覚に加えて視覚・聴覚など、他のモダリティを組み合わせることで多様な触覚を実現する、多感覚統合を用いたユーザインタフェース技術について述べる。第2.4節では、視触覚統合を定量化するための知覚モデルに関する先行研究、また人間の知覚モデルをベースとしたインターフェースの先行研究について述べる。

2.1 触覚に関する研究

2.1.1 手と触知覚

人間の身体の部位の中で最も使用頻度の高く、かつ高機能な部位は手と言っても過言ではない。古人類学によると、人類の祖先とされるホモ・ハビリス (*homo habilis* = 器用な人) は、直立二足歩行によって両手に自由を得て、約300万年前に道具を使い始め、進化の過程で高度な運動系・神経系を発達させたと言われている [15]。

Penfieldのホムンクルス(図2.1)に見られるように、人間の脳の感覚空間・運動空間の大部分を手の感覚が占めている [16]。手で物体を持ち上げる、手のひらで転がしたり投げたりする、様々な道具を用いて精密に手加工するといった複雑な動作を可能にしているのは、解剖学的に多自由度な構造があることによる運動器としての機能と同時に、極めて纖細な感覚器としての機能：触知覚フィードバックがあることに由来する。

皮膚感覚器官はメルケル細胞、マイスナー小体、パチニ小体、ルフィニ小体といった機械受容体 (mechanoreceptor, 図2.2) が真皮から皮下組織にかけて分布しており、それぞれの器官は異なる周波数特性を持つ触覚刺激に対応していると考えられている [17]。とくにルフィニ小体は、皮膚にかかる圧力に対して応答する器官として知られている [18]。また、物体を把持する際に生じる筋肉や腱の緊張といった深部感覚や、自己の身体部位の位置情報としての体性感覚 (proprioception) も、触力覚を構成する感覚を担っているとされる。心理学者Katzはこの触覚について、視覚が物

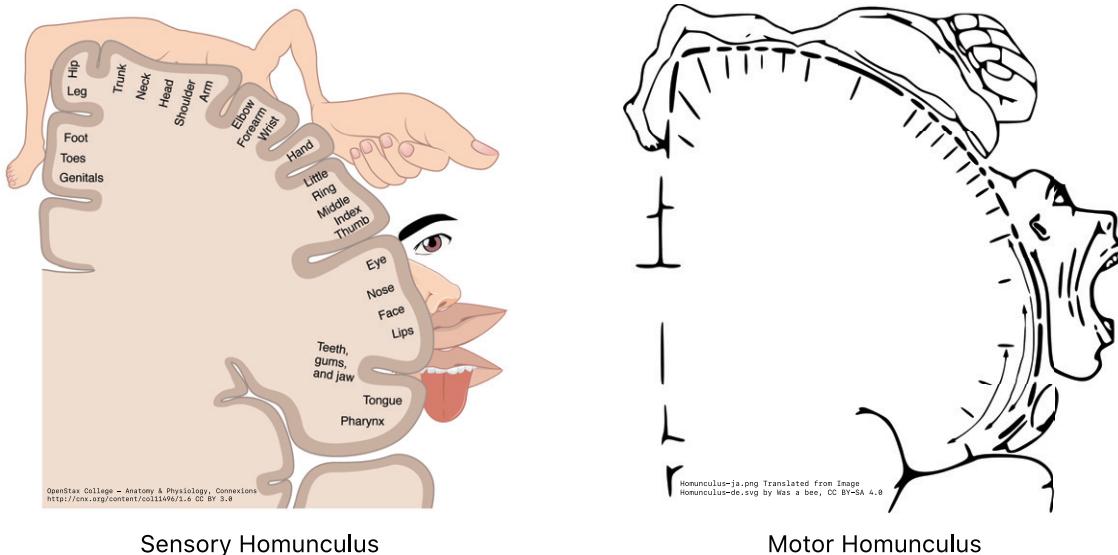


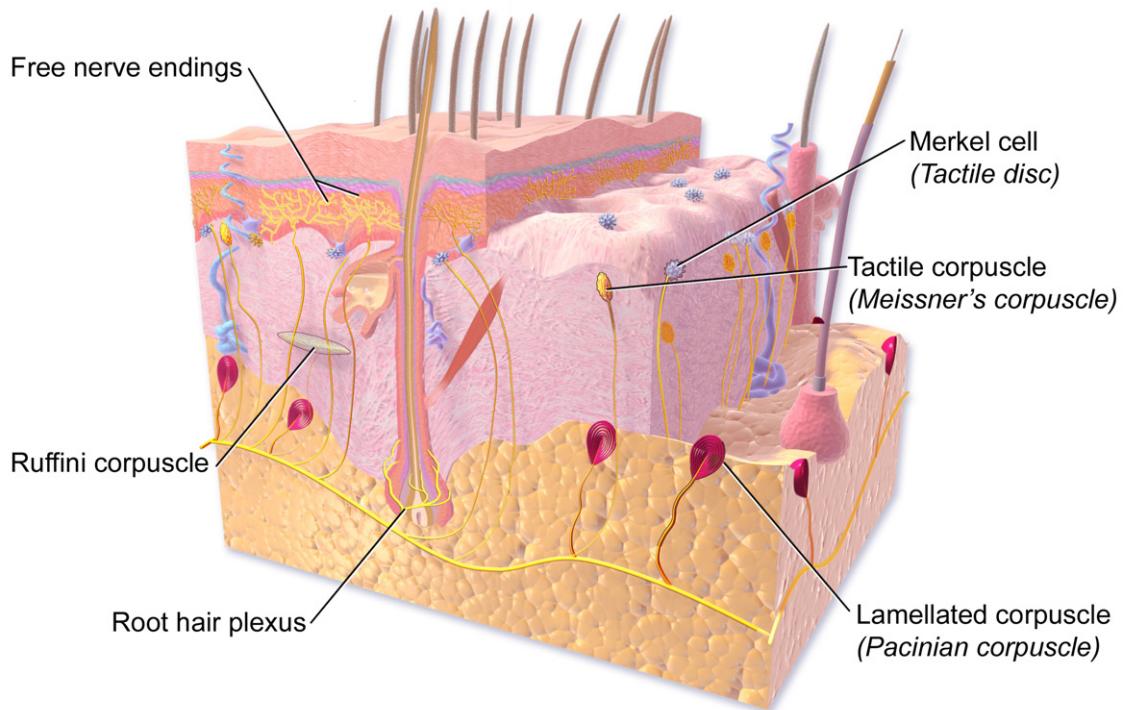
図 2.1: Penfield のホムンクルス. 脳機能局在論によると人間の手は運動野・感覚野双方の空間の大きな割合を占めていると言われている. [16]

体の性質によって影響を受ける客観的な成分を含む感覚とすれば、触覚は自己の身体の主観的な成分と、対象の性質の客観的な成分が不可避的に結びつく両極的な感覚である、と述べている [19].

2.1.2 手による物体の形状知覚

人間は触覚によって外界、特に物体形状を知覚する能力に秀でている。

一般家庭にある道具などの物体を 100 種類ほど集め、目隠しをした状態で人に物体を渡しても、かなり高い精度でかつ高速に（およそ 2, 3 秒で）何を渡されたか理解できることが知られている [20]. また、人間は単に物体を手のひらに置くだけでなく、指先でなぞる、手でくるむなどといった動作で物体の形状を様々な方法で把握しようとする。Lederman et al. は、人間が自ら手を動かして、物体の形状を知るために人間の手の動きを“探索的動作：exploratory procedures (EPs)”として、図 2.3 左に示す種類の動作に分類している。また Gibson は、他の物体に触られる触覚 (Passive Touch) と、人間が手を動かして物体に触れる際の触覚 (Active Touch) はあくまで別のものであると述べている [21].



Tactile Receptors in the Skin

Blausen.com staff (2014). "Medical gallery of Blausen Medical 2014".
WikiJournal of Medicine 1 (2). DOI:10.15347/wjm/2014.010. ISSN 2002-4436. – Own work CC BY 3.0

図 2.2: 皮下に分布する機械受容器

2.1.3 把持物体の形状知覚:Dynamic Touch

Lederman et al. は、また EPs としてそれぞれの動きが、物体の体積や輪郭などのタイプの形状知覚にどう特化しているかを示した(図 2.3 右)。EPs(図 2.3 左)の中でも特徴的なのは、物体の重さを理解するために物体そのものを振る動作であり、EPs の中では唯一、物体全体の動きを伴うものである。このような動作によって、重力

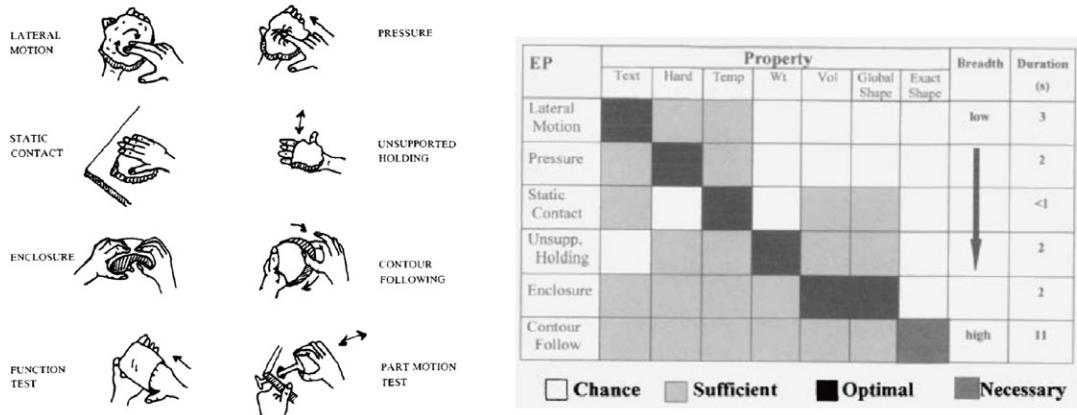


図 2.3: Lederman et al. による exploratory procedures(EPs) と、それぞれの EPs が支配的な物体の形状パラメータ [9].

などの時間的に変動しない一定の力 (statics) と、物体に加速度を加えた際に時間的に変動する力 (dynamics) の双方によって、物体の重量を理解できる。

特に物体が様々な長さ・幅を保つ場合、物体は把持する部位に対して固有の重量分布と重心位置を持つ。仮に手の接触部位全体に掛かる力が一様だとしても、物体を振ることで、物体の把持部位 (移動・回転の中心) と重心を軸とした慣性力：慣性モーメントによる様々な力が加わり、それをもとに物体の形状を推定する事が可能となる。剛体の慣性モーメントは、剛体中心から 3 軸に渡って、質量分布に対する二次モーメントを計算することによって得られ、各軸に対して 9 通りの慣性モーメントを 3×3 のテンソル表現にできる (慣性テンソル, 図 2.4)。

このように、物体を把持するだけでその物体を見ることなく、ある程度形状を推定することのできる能力を、Turvey は “Dynamic Touch” とした [12].

Turvey et al. の実験 [12] によれば、手に持った物体の長さや幅は、それに対応する主成分が大きくなるに連れて大きく知覚され、それに直交する主成分が小さくなるに連れて小さく知覚されることがわかったが、影響の度合いとしての指標であり、慣性テンソルの値だけでは物体の形状を一意に定められないとしている。物体の重量分布はある程度の幅・高さの知覚を与えられるが、最終的に物体の形状や「何を持っているか」という情報は、他の EPs や視覚、事前知識から得られる情報を用いて推定される。

Figure 5

The Inertia Tensor

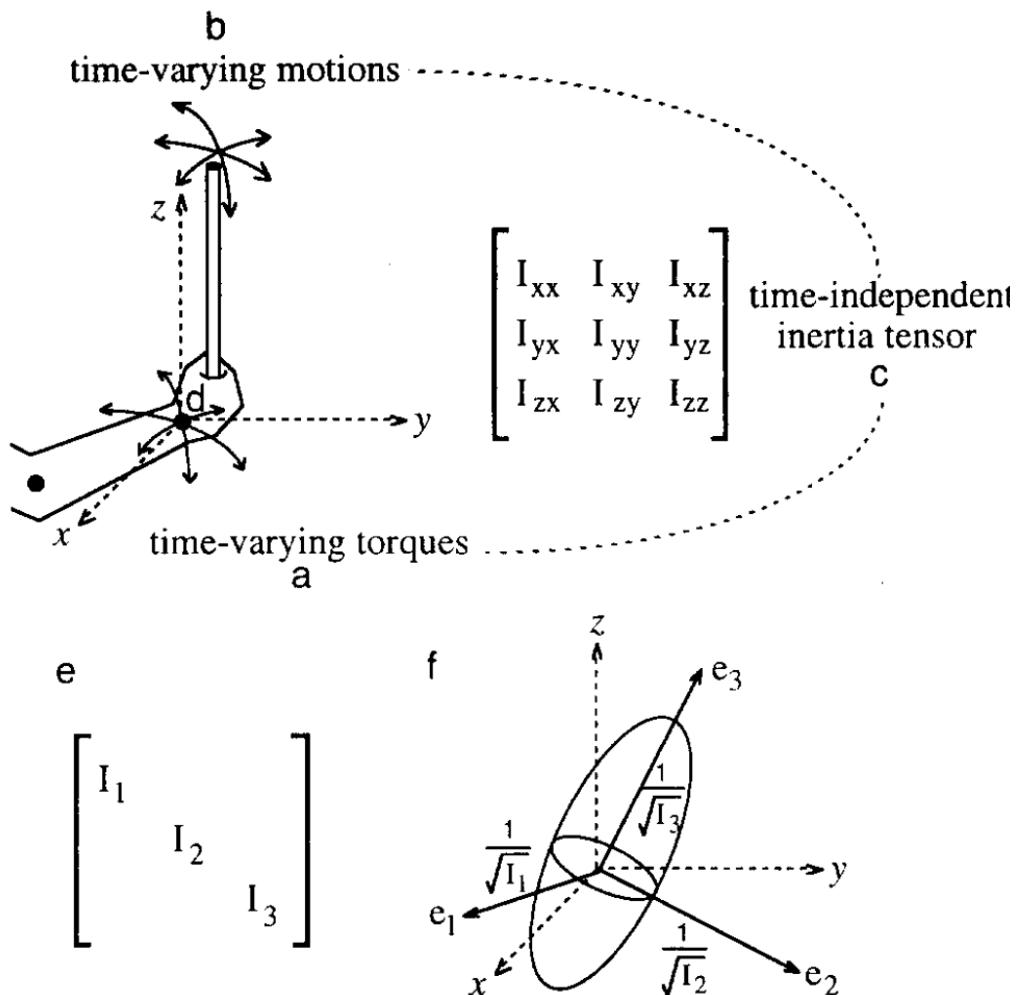


図 2.4: 慣性テンソル [12] の図。慣性テンソルのそれぞれの固有ベクトルと固有値は主成分を表し、それぞれ物体の慣性主軸とその方向の慣性モーメントに等しい。固有値の大きい順に第1主成分、第2主成分...となる。

Transcalibur は Dynamic Touch のコンセプトのもと、重量分布を変化させることにより、VR 空間内での高さ・幅の見た目に対する最適な触覚の手がかりを与えるというアイデアの上に成り立っている。

2.2 VRにおける触覚フィードバック技術

ドイツの哲学者 Kant は、その著書 “Der Aufbau der Tastwelt(触覚の世界)”において触覚という感覚刺激が「唯一の直接的な外界知覚の感覚であり、まさにその理由によって、もっとも重要な感覚でもあり、最も頼りになる教唆を与えてくれる感覚でもある」と述べている [22].

Kant の示すとおり、我々は、「触る」という直接的行為を通して、自身の周辺の世界が単に幻というわけではなく、それが真に実在し、それがそこに「ある」ことを知覚している (Kant の *Der Aufbau der Tastwelt* という表現は寧ろ、触覚によって自らにとての外界が構築: ‘aufbauen’ されていくという意味合いを含む).

物体表面の粗さや形状、硬さや温度を皮膚表面の感覚器官を通して知覚することで、その物体がどんな物体か、どのような性質かを知ることができ、触覚は自己周辺の実在感=リアリティに大きく寄与している感覚であると言える。それ故に、コンピュータが新たに作り出す作業空間において、バーチャルな物体をあたかも実際に触っているかのように感じさせる触覚ディスプレイの研究が進められてきた。

2.2.1 VRのための触力覚デバイス

皮膚表面を通してこれらを物理的に刺激して触覚を提示するデバイスや、指や手腕などに力を加えて動きを制限するなどして物体形状を提示するデバイスなどが多く提案されているが、それらは複数のタイプに分類できる。

接地型

接地型デバイスは手指に反力を加えることで物体との接触感を提示するデバイスであり、反力を生じさせるために身体の一部、または机の上などに接地する機構を持つものである。

これまでアクチュエータを用いて手指に力覚を提示させるデバイスが提案されている [2] [4] [23](図 2.5, 図 2.6). 接地型デバイスは反力を逃がすための構造を前提としているため、ヘッドトラッキングを含めた自由な移動を伴う VR アプリケーションには利用しづらいという欠点がある。一方、手指にリンク機構を取り付けること

で触覚フィードバックを与えるコントローラは、手首などの自身の身体の一部に接地しているため、ユーザはデバイスを装着したまま動くことが可能である。

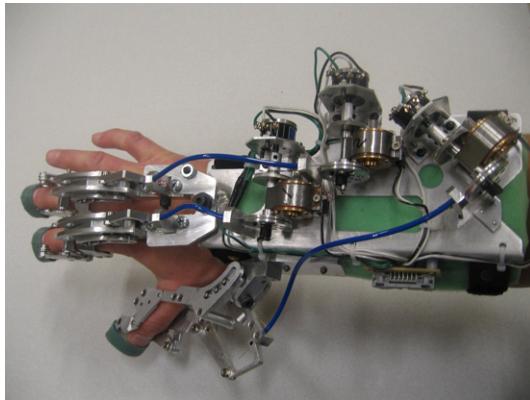


図 2.5: Magnetorheological fluid based haptic device [4]



図 2.6: Geomagic Touch [23]

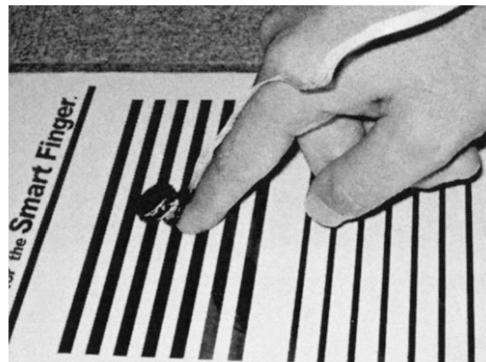


図 2.7: Nail-mounted tactile display [24]

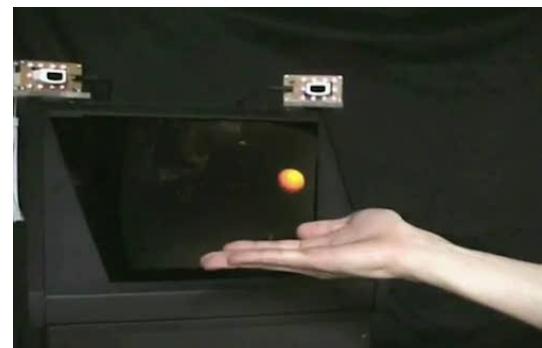


図 2.8: Touchable Holography [6]

非接地型

持続的な反力を発生させるための接地機構を持たず、モータやリニアアクチュエータなどの振動刺激を提示することで触覚を提示するデバイスが提案されている。爪上に振動モータを装着し、振動させながら指のなぞり動作を行うことで、凹凸感を知覚させられるデバイス [24] や、指先に取り付けたベルトで剪断力を与えること

で物体に触れた際の皮膚変形を再現することで触力覚を提示するシステム [25](図 2.7), 皮膚表面に電極を接触させることによって感覚受容器を直接電気刺激するデバイス [26] なども提案されている。このようなデバイスはアクチュエータの小型化・軽量化が可能な一方で、提示できる力の強さや種類が限られるという欠点もある。

EMS(Electrical Muscle Simulation:電気的筋刺激)を用いて、VR・AR 作業空間で力覚を提示するデバイスが提案されている。このシステムでは、VR 空間にに対する手の位置に応じて入力電流を調整し、あたかも手が物体に触れた際の反力が加わったような力覚フィードバックを与える事ができる [27] [28]。

本研究の対象となる重量移動型デバイスはこの非設地型に分類されるが、詳しくは後述する。

非接触型

Hoshi et al. の超音波による触覚ディスプレイ [6] は、超音波発生装置アレイから発せられた音波が強め合う点において音響反射圧が生じることで、皮膚表面に刺激を提示することのできるデバイスであり、デバイスを身体に装着する必要がなく空中で触覚を提示できる(図 2.8)。この手法は 3 次元空間のごく限られた領域のみでの触覚提示にとどまり、また強力な圧感や把持感などの触覚フィードバックを得られないという欠点がある。

2.2.2 重量・重心移動型デバイス

前述の非設地型に分類されるが、物体の重量分布を変化させることで物体の把持感覚を変調するデバイスが提案されている。Niiyama et al. は常温で液相にあるガリウム合金を、ポンプを用いて物体内の空洞内に送るメカニズムを用いた重量変化型のタンジブルインタフェースを提案している [10](図 2.9)。また Hemmert et al. は、モバイルデバイスを模した箱型デバイスの重量位置をモータフェーダによって変調することにより、バランスをとるデバイスを提案している [29](図 2.10)。

VR アプリケーションを目的として開発されたデバイスでは、Zenner et al. は 1 次元重量移動機構を備えた Shifty [30](図 2.11) や、空気抵抗を利用した Drag:On [31](図 2.12) を提案している。重りは棒状のデバイスのレール上を、ステッピングモータに

によるベルト駆動機構によって送られている。Zenner et al. の実験では、興味深いことに、VR空間での視覚効果を利用することで、VR環境内の物体の長さだけではなく、重さ・厚みや、アニメーションによってリアリズムなどが増強されることを示している。両手持ちのデバイスとしては、Sagheb et al. らは容器内の液体のスロッシングを表現できるものが提案されている [32](図2.13)。また、ドローンのロータによって風を吹き出すことによる、流体運動量から得られる反力を用いて擬似的に重心移動を表現する手持ち型VRコントローラが提案されている [33](図2.14)。



図 2.9: Weight and volume changing device with liquid metal transfer [10].

図 2.10: Weight-Shifting Mobiles: Two-Dimensional Gravitational Displays in Mobile Phones [29].



図 2.11: 一次元重量移動型VR触覚コントローラ Shifty [14].

図 2.12: 重量移動・空気抵抗型VR触覚コントローラ Drag:on [31].



図 2.13: 容器内の液体の揺動をシミュレートする重量移動型デバイス SWISH [32].

図 2.14: ドローンローターによって触覚を再現する重心移動型デバイス Aero-plane [33].

これらの重量移動型デバイスはすべて backdrivable なメカニズムで、デバイスを振ったりする際に外力によって重りが動くため、意図しない重量分布の変化が起きてしまう・重りの移動速度が正しく制御できなくなるなどの可能性がある。Transcalibur はウォーム機構によって non-backdrivable な機構となっており、外力によって重りの位置が動かないようになっている。この機構に関しては次章で詳しく述べる。

2.2.3 手持ち型 VR 入力インタフェース

前節では、様々な形状を提示する目的で開発された重量・重心移動型デバイスを挙げた。他方、エンタテイメント分野においては、スポーツやアクションゲームなどの文脈で、ユーザに没入感を与える目的で、その文脈に合った形状に既にデザインされた手持ち型 VR インタフェースが提案されている。

任天堂の光線銃 [34]・PlayStation のガンコン [35] などはブラウン管 TV の走査線などを利用した銃型の入力インタフェースである(図 2.15)。タカラ バーチャルベースボール [36] は、野球バット型のデバイスに加速度センサやスピーカを搭載して、野球を模したデジタルゲームをプレイできるデバイスである。

このような手持ち型 VR 入力インターフェースは、設計の段階で体験を一つに固定しているために、モチーフとなる物体の形状を入力インターフェースとすることができる。しかし近年は Oculus Store・Steam といった VR 体験用のアプリを販売・配布するプラットフォームによって、一つの機器で多様な VR 体験を楽しむ方法が主流となっている。Transcalibur のシステムは單一コントローラで様々な VR 形状を提示できるシステムという設計思想のもと開発した。



図 2.15: タカラ バーチャルベースボール(左)と、namco(現 バンダイナムコエンターテイメント) GunCon. タカラのバーチャルベースボールはユーザのバットを振る動作によってスピーカーから効果音や実況音声が流れる。GunCon や任天堂の光線銃は多くのゲームタイトルが対応した。

2.3 多感覚統合を用いた触覚インターフェース

人間の五感はそれぞれの感覚器官から一定の神経路を伝わって脳内へ送られるが、それぞれのモダリティは単に独立ではなく、それらの信号を脳内で統合し、意味付けが行われることが知られている。

例えば、同じ重さの物体でも、異なるサイズの物体を持ったとき、小さい物体を持ったときのほうが大きいものを持ったときよりも重く感じられるという現象は、Size-weight illusion(Charpentier illusion)として古くから知られている [13]。

また、触覚フィードバックに合わせて効果音を鳴らしたりすることで、テクスチャ感覚が増強される効果が知られている [37,38]。このように、ある感覚に対して別の

感覚（モダリティ）を合わせることによって、その感覚が増強される効果は「マルチモーダル効果」[39–41]として知られている。人間の認知過程で起こる感覚の統合によって生じる錯覚現象を用いることで、ハードウェアの制約を超えた表現が可能となるため、VR技術においてはこのような研究が活発に行われてきた。本節では多感覚統合を応用した触覚インターフェースについて、関連研究を述べる。

2.3.1 視触覚インターフェース

視触覚相互作用によるインターフェースは、視覚による触覚の変調を用いて、インターフェース上での触覚インタラクションを拡張する目的で研究・開発されてきた。Transcaliburは視覚が形状知覚に与える影響を応用したシステムであるが、コンピュータインターフェースにおいて視触覚相互作用を用いた前例とその効果について述べる。

コンピュータ上に表示させるマウスや、ウィンドウをスクロールさせる際の速度を遅くすると、「重くなった」用に感じられるような、視覚のみで生起させられる触力覚はpseudo-haptics:疑似触力覚として知られている[42]。Lécuyer et al.は、物体の凹凸感覚やテクスチャ感覚をマウスカーソルの形状変化によって表現するシステムを提案している[43–45]

pseudo-haptics現象は、視覚のみで触力覚に影響を与えることを示しているが、物体に触った状態で、その物体をディスプレイを通して視覚的に変調することで、触力覚を変調したり、pseudo-haptic feedbackを生起させたりする手法が提案されている。Ban et al.の研究[46–48]では、ビデオシースルーシステムを通して見る自分の手を変形させた映像を提示することで、形状知覚を変化させるシステムが提案されている。形状知覚操作システムのMagic Pot[46]では、円筒の物体を画像処理によって歪ませることで、実物体に対する形状変化が0.7倍～1.4倍のものに関しては形状知覚を変化させることができると報告している(図2.16)。

Pseudo-haptic feedbackは形状知覚の変調のためにも用いられている。Parastoo et al.の研究[49]では、Pin-based shape displayである形状の物体を触っている自らの手指の位置を変調して、実際に触っている物体の形状よりも大きい、もしくは小さい物体などを触っているような感覚を得られるシステムが提案されている。

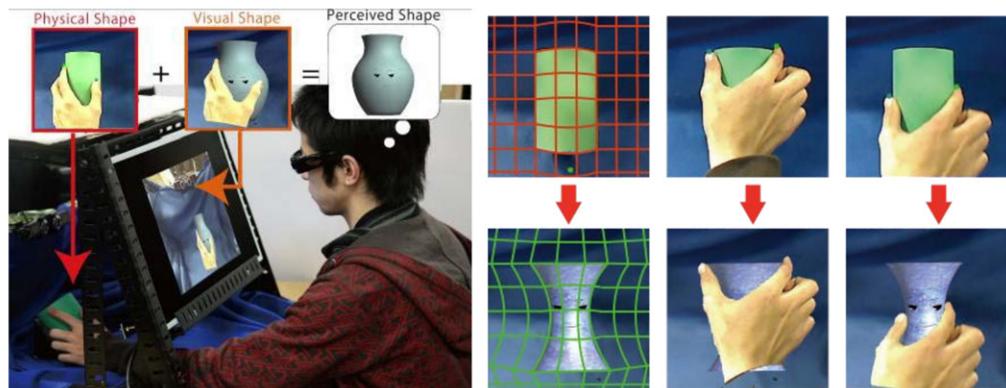


図 2.16: Magic Pot [46]

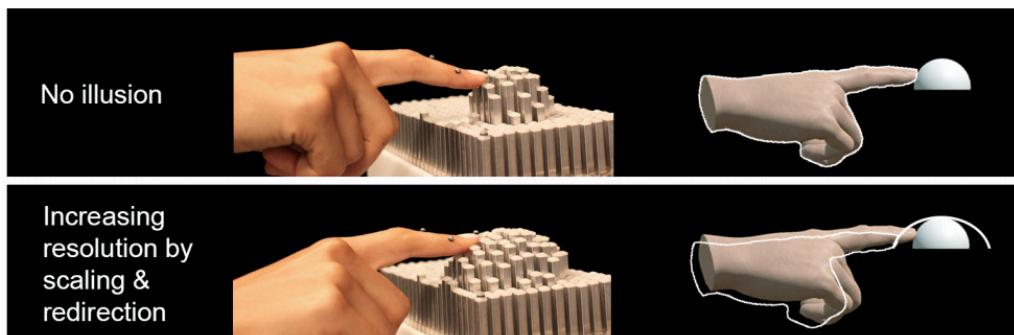


図 2.17: pin-based shape display による形状知覚錯覚システム [50]

また、pseudo-haptics が効果的に生じる条件として、自分が操作対象とするものに対して身体所有感を生起させられていることが挙げられる [51]。とりわけ VR 環境下では、自己のアバタの腕や全身を操作対象として、それらを視覚的に変調させることによって、強力な pseudo-haptic feedback を生起させるための研究が行われてきた。

Pusch et al. の実験 [52] では、VR 空間の中のパイプの中を流れるフローの中に自身の手を入れ、手がフローの方向に動いていくことによって疑似触覚を提示できる MR システムが提案されている(図 2.19)。また、アバタの関節角を適切に補正することで、効果を増強させられることも知られている [53]。

Taima et al. の研究 [54] では、物体の持ち上げ動作においてビデオシースルー HMD

によって見たときの映像を変調させ、自身の手の動きを増幅させて提示することで、物体の持ち上げ反復回数を増し、持久力を拡張させられることを示している。このように主観視点からの自身の手をバーチャル空間で用いた疑似触力覚提示技術も提案されている（図2.20）。

また、Juregui et al. の実験 [50] では、ウェイトリフティングのダンベルを持っているアバタが画面上に表示され、アバタを見ながらダンベルを持ち上げる動作をする際に、実際の腕の移動量に対してアバタの腕の移動量を小さくすることで、疑似的な重量感を提示できることも分かっている（図2.18）。

以上に述べた視触覚相互作用によるインタフェースは、触覚デバイスの効果を増幅させる目的で、または触覚デバイスを用いずに触覚を提示する目的で用いられる。また、視触覚相互作用はVR環境下においても効果的に生じることが示されてきた。しかしながら、これらの触覚現象は個人差や視覚効果の違いによって、狙った触力覚を提示することは難しい。

Transcalibur はこれらの関連研究にて述べたような視覚による触覚の影響を利用することで、効率よく VR 物体の形状を提示できるのではないかというアイデアに基づいているが、さらに視覚効果が触覚に及ぼす影響を扱いやすい形にするため、データドリブンな手法で知覚モデルを構築している。本研究における知覚モデルは、2.4.2節に関連研究を、4章、または5章においてその実装を述べる。

2.4 知覚・認知の数理モデルとその応用インターフェース

前節では、視触覚統合を利用したインターフェースについて述べた。しかし、一般にそのような錯覚現象は、様々な種類の情報が得られかつ一定の条件を満たすことで生起するものも多い。錯覚現象に限らず、複雑な情報を統合する意思決定のプロセスも、あらゆる前提知識などを含めた脳内の高次の情報処理によるものであり、故にこれらを前もって予測したり、その度合いを定量化することが難しい場合がある。

このような問題に対し、実験を通して知覚や認知のプロセスを数理モデル化したり、データを集めることによって数理モデルのパラメータを推定したりする手法が取られている。また、数理モデルによって人間に最適なフィードバックを与えるインターフェースについての研究もある。本節では知覚の数理モデル、およびその応用

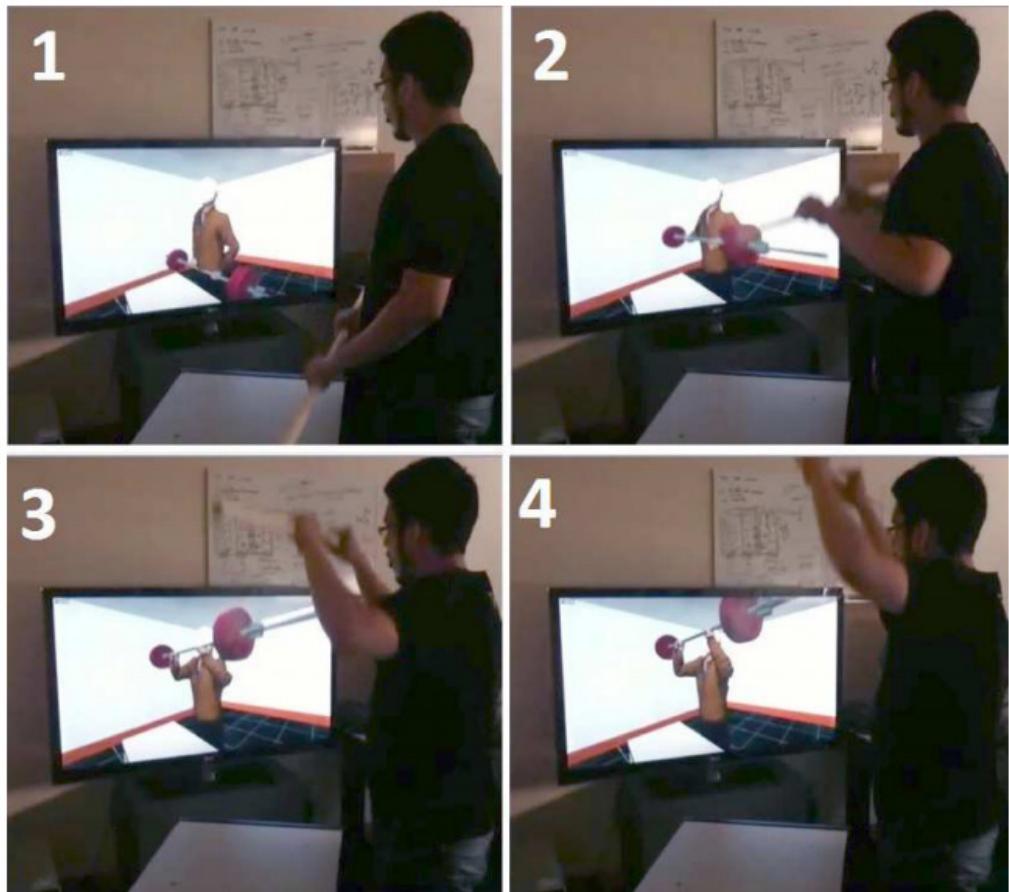


図 2.18: 画面上のアバタ動作による疑似重量感提示システム [50]

インターフェースの先行研究について述べる。

2.4.1 視覚と触覚の統合を例とした知覚の数理モデル

先にも述べたとおり、視覚は視神経を通して信号が伝達される脳神経系であるのに対して、触覚は、皮下機械受容器を通した脊髄神経系という異なる末梢神経系を通っている。様々なモダリティの信号が統合されるのは脳内に伝達されてからであるが、各モダリティの入力信号のいずれかが必ず優位で、その他の信号を上書きしてしまうということではなく、あくまで互いにより信頼できる情報を補完しあっているに過ぎない。

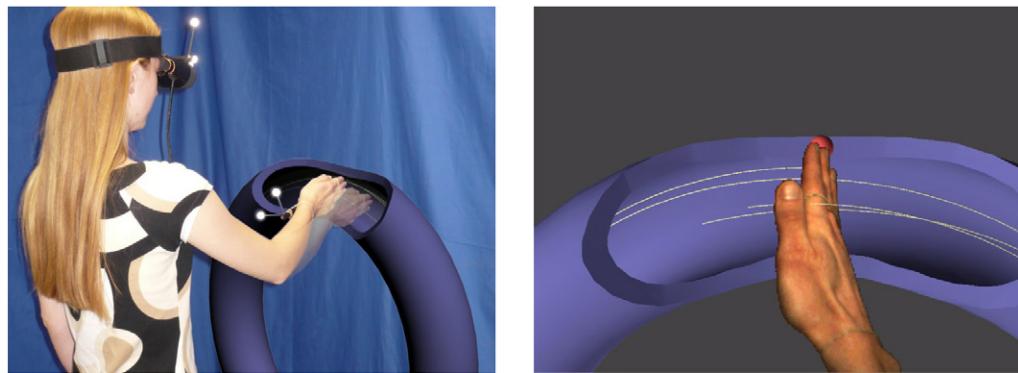


図 2.19: HEMP:力場による疑似触覚システム [52]

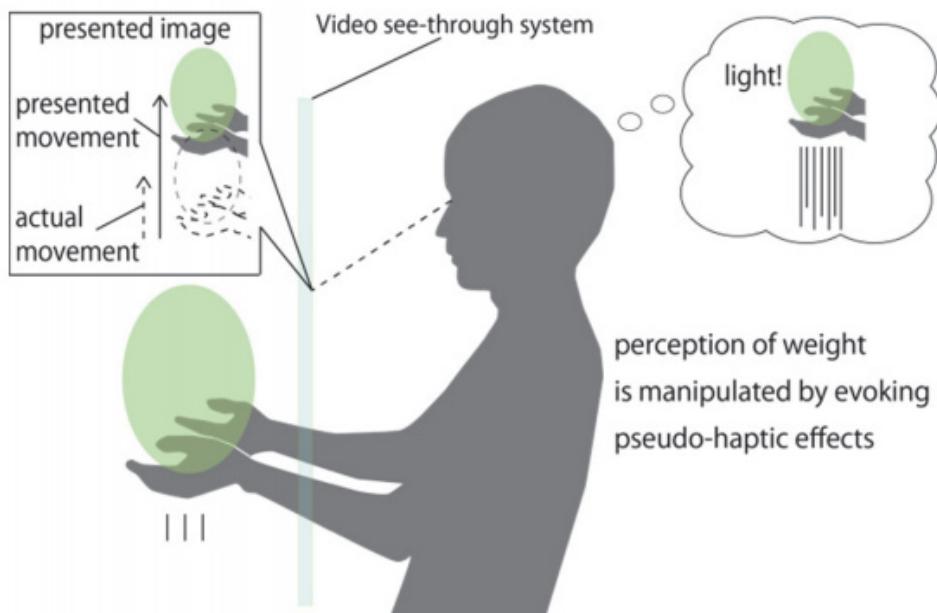


図 2.20: Pseudo-haptic feedbackによる拡張持久力システム [54]

このような情報補完のメカニズムについて、それぞれのモダリティの知覚量を確率分布で表し、脳内に伝達された際にはその同時分布：すなわち尤度を最大化するような知覚量に変換した上で推定し、認知していることが Ernst et al. の研究で示されている [55].

Ernst のモデルに従って、ある物体の形状やテクスチャを μ とした時に、視覚と触

覚の統合によって形状が推定されることを考える。視覚によって推定される形状 \mathbf{x}_v の確率分布を $p(\mathbf{x}_v|\boldsymbol{\mu})$ とし、これが多変量 Gauss 分布 $\mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}, \Sigma_v)$ に従うとする。同じく触覚で推定される形状 \mathbf{x}_h に対しても $p(\mathbf{x}_h|\boldsymbol{\mu}) \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}, \Sigma_h)$ とする。この場合、それぞれのモダリティによって知覚される形状が独立であるとして、統合されて知覚された形状の尤度は同時分布として

$$p(\mathbf{x}_v, \mathbf{x}_h|\boldsymbol{\mu}) = p(\mathbf{x}_v|\boldsymbol{\mu})p(\mathbf{x}_h|\boldsymbol{\mu}) \quad (2.1)$$

$$= \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}, \Sigma_v)\mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}, \Sigma_h) \quad (2.2)$$

$$\propto \exp\left((\boldsymbol{\mu}_{MLS} - \boldsymbol{\mu})^\top \frac{1}{2} \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\boldsymbol{\mu}_{MLS} - \boldsymbol{\mu})\right) \quad (2.3)$$

と示される。新たな正規分布の分散と最尤推定量は、

$$\boldsymbol{\Sigma}^{-1} = \boldsymbol{\Sigma}_v^{-1} + \boldsymbol{\Sigma}_h^{-1} \quad (2.4)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\boldsymbol{\mu}_{MLS} = \boldsymbol{\Sigma}_v^{-1}\hat{\mathbf{x}}_v + \boldsymbol{\Sigma}_h^{-1}\hat{\mathbf{x}}_h \quad (2.5)$$

と示されることになる。2.5式は、精度行列 $\boldsymbol{\Sigma}^{-1}$ がそれぞれのモダリティの精度の和になっていることより、各モダリティを統合することによってより確度の高い形状推定をすることを示す。

また2.5式は各モダリティの推定量について、各モダリティの精度行列についての重み付け和になっており、知覚した結果の形状パラメータが、統合の過程で確度の高い方のモダリティが知覚した形状に引きずられる事がわかる。Ernst et al. の実験ではそれぞれのモダリティについての信号ノイズ=分散を変えた上で、マルチモーダルな知覚において上式で示したような尤度を最大化するようなプロセスを経ていることを示している。

このモデルを時系列データに応用したのが、かねてから信号・制御工学で用いられるカルマンフィルタであり、ノイズを含む複数の情報を受け取りつつも、精度の高いほうの信号を信頼するように推定量を返すフィードバックゲインを求めるものであり、構造として Ernst のモデルと同様である。

Ernst のモデルは、カルマンフィルタと同様に、2つの強い仮定に成り立っている。第1に、知覚のモデルが正規分布に従っているということ、第2に、それぞれの知覚モダリティの誤差・分散が既知であるということである。Transcalibur は、視覚

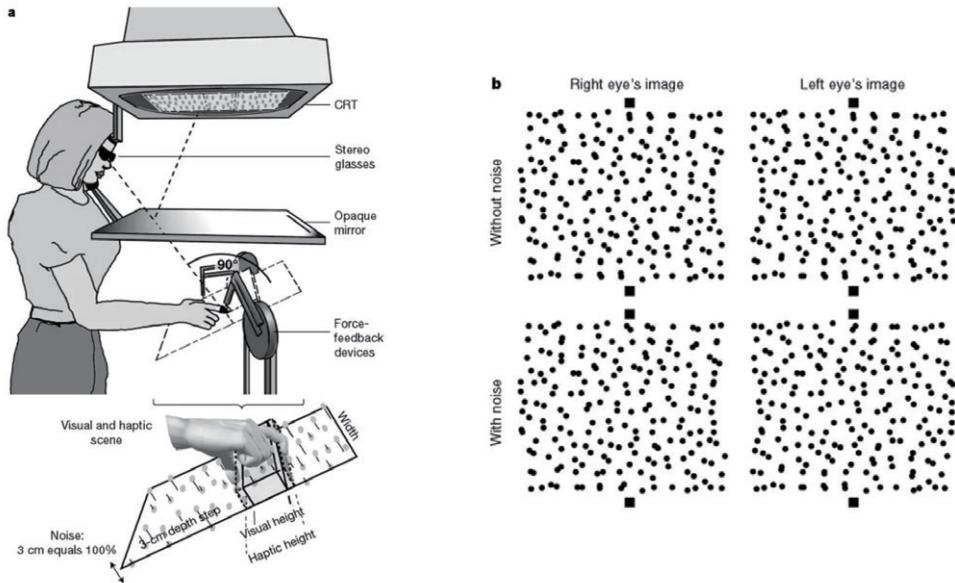


図 2.21: Ernst et al. の視触覚相互作用の実験系 [55]. 左図の触覚刺激に対して、右図の立体視可能なドットはノイズ量が制御可能である。

から得られる情報の確度を高いとしつつ、デバイスによって得られる触覚フィードバックによって知覚を補完している。

Ernst のモデルは視覚ノイズをドットなどで表現した極めて単純化・統制された実験系にて成り立つものであった。しかしながら VR 空間内での様々な形状という多量のパラメータを含む知覚において、それぞれのモダリティを紐づける精度行列を前もって予測することは難しいため、本研究では、実験によって得られるデータ対を利用してモデルを学習させる手法を取っている。次節では、このようなデータドリブンな手法によって得られたモデルを用いたインターフェースについて、関連研究を述べる。

2.4.2 データドリブンな手法による知覚・認知の数理モデル

プロダクトのデザイン、写真の構図や美術作品の審美性などといった尺度による評価は、主に長い歴史的・文化的な背景や経験によって得られる解釈や、ハイレベル

ルな要求仕様に基づいて定められる。そのような尺度はブラックボックスな関数であるとして、一般的に定量化することが難しいとされている。故に、あらかじめ集めた多数のデータに基づいて、それらを計算機的に扱いやすい形にするデータドリブンな手法が用いられ、クラウドソーシングやユーザインタフェース分野へ応用されている。

Koyama et al. の研究 [56] では、静止画像の露出・コントラストなどのパラメータ最適化において、クラウドソーシングを用いた手法を用いている。複数のパラメータを入力変数、静止画像の良さを出力とするブラックボックス関数を仮定し、ガウス過程をベースとしたベイズ最適化の手法を用いて、複数のユーザからの 1 次元スライダ入力をもとに最適出力を求めている。

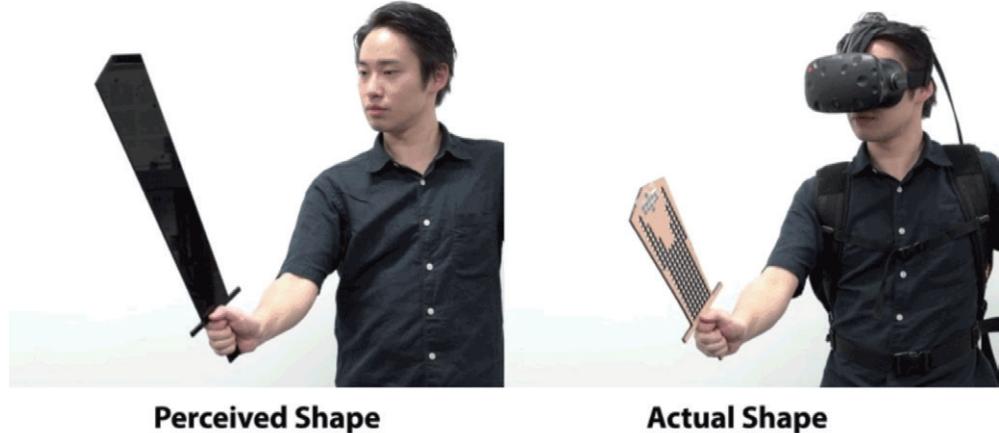


図 2.22: Furjinawa et al. の知覚モデルに基づいた VR 形状のファブリケーション手法 [57].

Koyama et al. の研究では見た目や美しさといった高次の認知過程による指標を最適化しているが、このような手法は触覚インタフェースへの応用もなされている。Michal et al. の研究 [58] では、デジタルドローイングに用いる入力用のスタイルスペンを用いる際に、ペン先から伝わる感触の知覚空間を構築し、それらをペン先の材料や形状といった物理空間に変換するモデルをデータドリブンな手法で構築する

手法をとっている。

また、VR分野においては、Fujinawa et al. の研究 [57] で、VR空間上で把持している物体の形状を違和感なく感じさせつつ、現実世界で把持している物体のサイズや重量分布を、物体の形状が最小となるように出力する Computational Fabrication を応用した VR コントローラが提案されている。予めユーザ実験で集めた、把持物体の重量分布と VR 空間での形状のペアを収集し、それらのデータに基づいて回帰モデルを構築し、最適な VR コントローラの形状を出力するといった手法が取られている。

Fujinawa et al. の研究では、実際に持っている物体は VR 空間のものよりも小さいにもかかわらず、あたかも VR で見える物体を持っているように感じさせることのできる現象を、**Haptic Shape Illusion** としている。本研究の Transcalibur では Fujinawa et al. の研究に対し、低自由度な重量分布変化機構と Haptic Shape Illusion を組み合わせ、単一のコントローラで様々な形状を提示するためのシステムを目指している。

以上に述べた先行研究のように、ある知覚現象について、ボトムアップな数理モデルを構築するのが難しい際には、データドリブンな手法でモデルを構築することがある。Oulasvirta et al. は、ユーザから観測されるデータや数理モデルに基づいて、コンピュータが自動的にインタラクションの質を向上させる・モデルを更新する手法を Computational Interaction とした [59]。特に、昨今の VR 利用人口の急激な増加を考えたとき、ユーザからの様々なフィードバックを用いて触覚現象をよりリアルなものにできることが期待でき、実社会への実装においてはより適した手法であると考えられる。Transcalibur では、視覚と形状知覚、場合によっては、動的形状知覚を扱う複雑系を扱うため、データドリブンな手法を用いて知覚モデルを構築した。さらに、Fujinawa et al. の手法では不可能であった、VR 形状の時間的変化に合わせた Transcalibur の変形を扱える知覚モデルを構築し、違和感なく形状変形を提示できる最適なパラメータを求める知覚モデルを構築した(第5章)。また本研究で構築したシステムでは、ユーザから得られる多数のデータに基づいて、Transcalibur の状態が錯覚を含めた形状知覚を最適化する意味で自動的に定まるという、Computational Interaction の要素を含む。

2.5 本章のまとめ

本章では、触知覚・物体形状知覚ならびに、VR触覚提示技術や、多感覚統合を用いた触覚インターフェースについて述べた。また関連して、知覚のモデル化について、視触覚ユーザインタフェースやクラウドソーシング分野で用いられている手法について述べた。物体の形状知覚提示はVRへの没入感を高める上で重要であり、視触覚統合を用いることでより効率的に表現できることが期待されることについて議論した。次章以降は、Transcalibur：形状変化VRコントローラの提案についての詳細、知覚モデルの構築、およびその実証実験について述べる。

第3章

**Transcalibur:重量分布変化による形状
提示VRコントローラ型デバイス**

本章では、2次元平面上の重量分布を変化させるVRコントローラ型デバイス:Transcaliburのハードウェア構成について述べる。第3.1章では、Transcaliburの概要について述べる。また、重量分布を変化させるメカニズムについて、その機構と詳細について述べる。第3.2章では、初期のプロトタイプについて、その性能評価を行った際の結果について述べる。

3.1 Transcalibur の概要

本節では、Transcaliburのハードウェア構成について述べる。

Transcaliburは、2つの機構によって重量分布を変化させるVRコントローラ型デバイスである。図3.1に、Transcaliburの概要を示す。

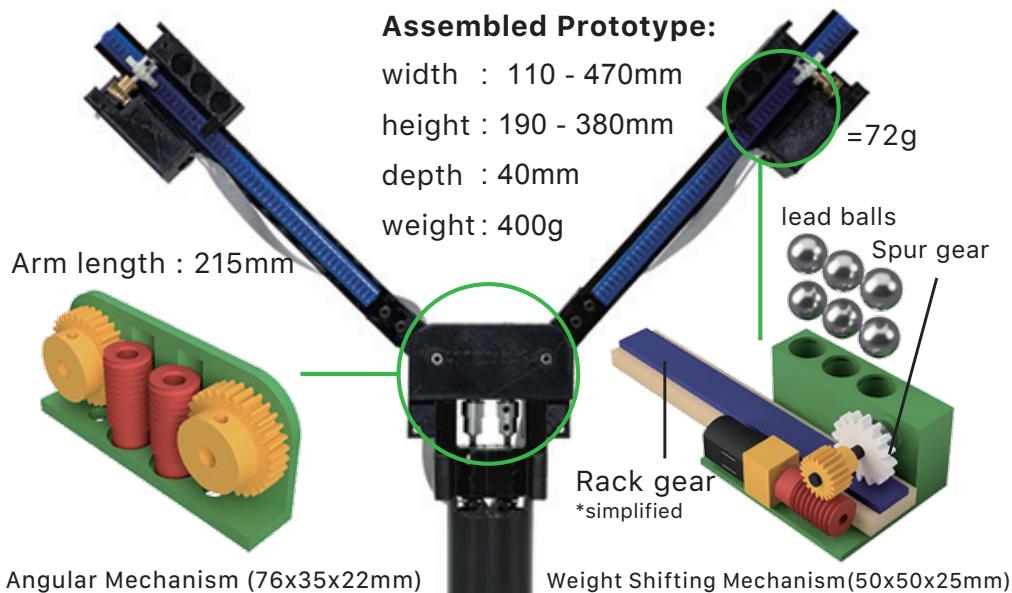


図 3.1: Transcalibur：ハードウェアの概要

Transcaliburのプロトタイプ本体はPLA製で3Dプリンタで造形したハンドル部分・または重りのモジュール部分と、レーザ加工機で切り出したアクリルのアーム部分に分かれる。Transcaliburは3次元CADのFusion 360を用いて設計した。ハンドル上部にはAngular Mechanism(3.1.1節)があり、この機構がアームの角度を変える。

またそれぞれのアーム上の重量モジュールには Weight Shifting Mechanism(3.1.2 節)があり、この機構がアーム上の重量モジュールの位置を変える。

Transcalibur の設計思想として 2 点が挙げられる。第 1 に、重量分布を 2 次元に渡って変化できること、第 2 に、外力によって重量分布が容易に変わらないことである。とくに後者について、先行研究の Shifty [14] や Niiyama et al. の手法 [10] については DC モータやベルト駆動機構を用いており、重力やデバイスを降った際の遠心力などによって、重りの位置が変わったり、駆動時に著しく速度が変化したりする事がある。このような問題を解決するために、モータからの動力を伝えながらも、外力の影響を受けない、non-backdrivable な機構を用いた。試作した Transcalibur は全体重量が約 400g となった。

3.1.1 Angular Mechanism

Angular Mechanism は、Transcalibur のアームの角度を変えるための機構で、ハンドル上部に位置する。図 3.1 左下にカットモデルを示す。内部にはウォームが 2 つあり、それぞれのウォームは磁気エンコーダ付きマイクロギアードモータに接続されている。ウォームホイールは歯数 30、モジュール 0.8 のポリアセタール製ウォームホイール (MISUMI G80BP30-R1) を、ウォームは歯幅 14mm、モジュール 0.8 の SUS304(18Cr-8Ni ステンレス) 製ウォーム (MISUMI W80SUR1+) を用いた。ウォームはそれぞれウォームホイールに取り付けられており、ウォームホイールにアームが取り付けられている。よってウォームを駆動することによりウォームホイールが回転し、アームの角度が変わる機構となっている。この際、ウォームホイールを回転させてもウォームが回転しない機構となっているため、アームの角度は外力の影響を受けない構造となっている。また、Angular Mechanism のケーシングの外側に、HTC VIVE のトラッカーが pogo ピンを通して通信できるための端子を設けている。この通信端子を経由してトラッキングと同時に PC からの信号を伝送することもできる。Angular Mechanism はおよそ 2 秒でアームを約 90 度回転することができる。

3.1.2 Weight Shifting Mechanism

Weight Shifting Mechanism は、それぞれのアーム上にある 2 つ重りと駆動機構を兼ねるモジュールである。図 3.1 右下にカットモデルを示す。それぞれのモジュール内部は前節 Angular Mechanism と同じウォーム機構があり、ウォームホイールからはシャフトを通して平歯車に接続されている。ウォームホイールは歯数 20、モジュール 0.5 の真鍮製ウォームホイール (MISUMI G50B20+R1) を、ウォームは歯幅 13mm、モジュール 0.5 の SUS304(18Cr-8Ni ステンレス) 製ウォーム (MISUMI W50SUR1+B) を、平歯車は端数 16 モジュール 1 のポリアセタール製ギアでアルミ製のボスが圧入されているもの (monotaro 91622) を用いた。平歯車はアーム上に取り付けたラックギアとかみあっている。ウォームがモータで駆動されると、重りのユニットアーム状を平行移動するような機構となっている。ウォームホイールを回転させてもウォームが回転しない機構となっているため、重りは外力によって移動しない構造となっている。重りには鉄球を入れるためのスペースを設け、重量を調整できるようにしてある。今回用いた重りモジュールの総重量は 72g とした。Weight Shifting Mechanism は約 2 秒で 10cm の速度で動作する。

3.1.3 Transcalibur の制御

Transcalibur には 4 つのアクチュエータ機構があり、それぞれ Pololu 製のエンコーダ付きマイクロギアードモータによって動力を得ているとともに、重量モジュールの位置・速度制御をしている。マイクロコントローラとして Teensy 3.2 [60] を用いており、ARM Cortex-M4 MCU が 72MHz で動作し、ファームウェアは Arduino 互換となっている。電源入力は 12V とし、プロトタイプでは有線の AC/DC アダプタを通して給電し、レギュレータでマイクロコントローラ側の入力電圧 5V を供給した。モータはそれぞれ TB6612FNG DC モータドライバによって駆動される。これらドライバ基板とコントローラをプリント基板上に実装したものを、Transcalibur のハンドル内に収納した。図 3.2 に、制御システムの概要を示す。また図 3.3 に、Transcalibur のドライバ基板を示す。

Transcalibur では位置制御・速度制御ともに目標位置・速度に対する PID 制御を用いた。

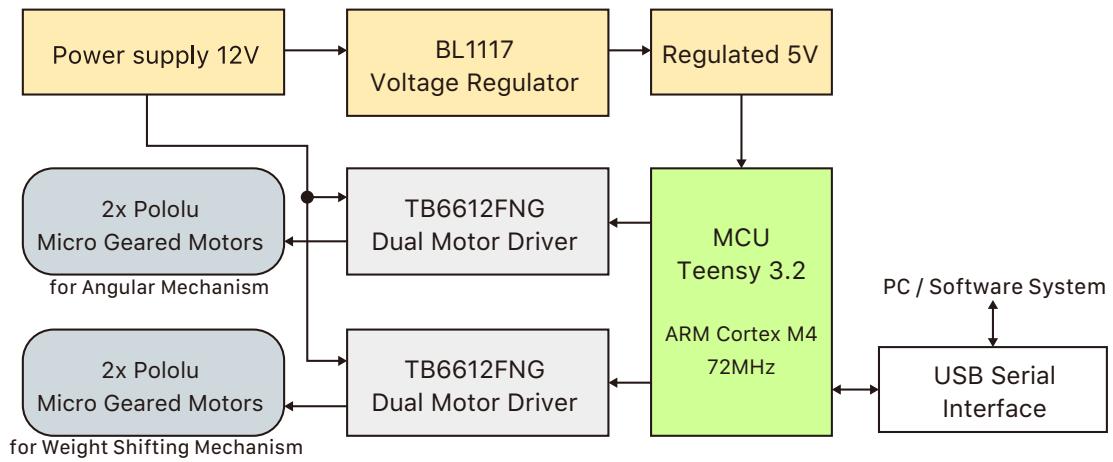


図 3.2: 制御システムの概要

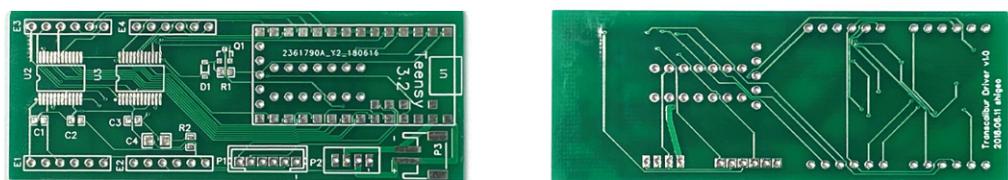


図 3.3: Transcalibur の制御基板(両面).

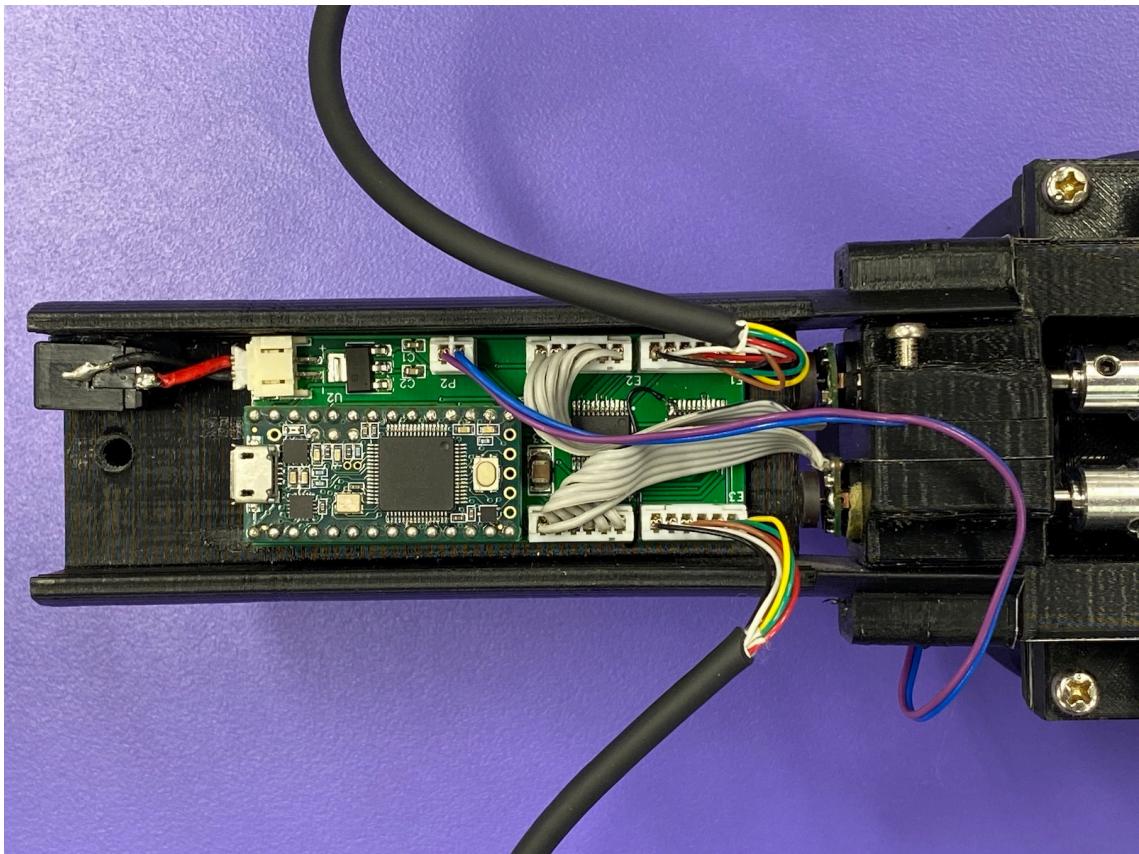


図 3.4: Transcalibur の制御基板はハンドル部に収納可能である。

3.2 予備評価実験・インタラクティブデモ

本節では、Transcalibur のプロトタイプの予備評価実験、およびインタラクティブデモ展示における定性評価について述べる。

3.2.1 予備評価実験

本節では初期に制作した Transcalibur を用いて、VR 環境下で様々な形状を提示できるか検証する予備実験を行った。初期のプロトタイプでは、Angular Mechanism のウォーム機構は、ウォームが1つとウォームギアが2つの構成になっている。すなわち、2つのアームは同時に駆動され、別々に角度を変えることはできない。初期

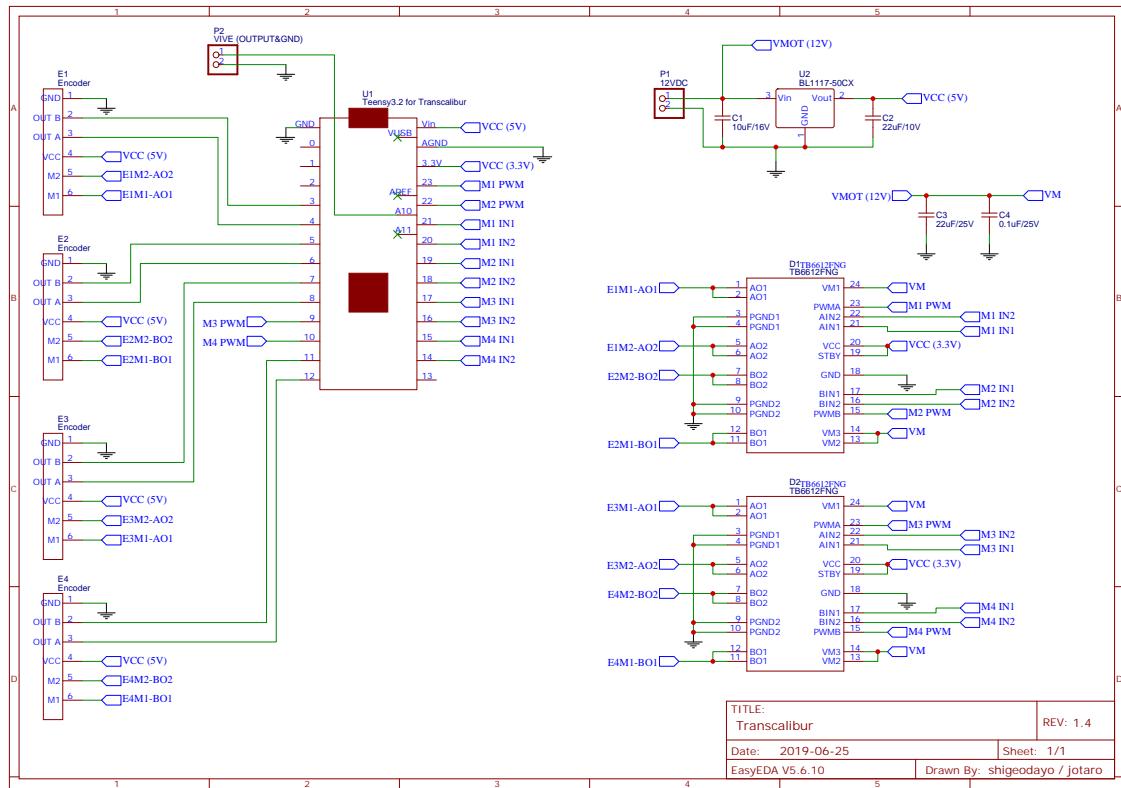


図 3.5: EasyEDA による Transcalibur の制御基板の回路図.

版の Transcalibur を図 3.6 に示す (以下 3.2 節で述べる予備評価実験の Transcalibur はすべて初期版を指す).

この実験では、調整法の手順にのっとり、実験参加者に、Transcalibur のある重りの分布に対して、VR 環境下で二次元物体の形状がどのような形状であるかを回答させた.

実験の目的

Transcalibur によって、VR 環境下で様々な長さ・幅の物体形状を提示できるかを検証することとする.



図 3.6: 初期版の Transcalibur. ウォームが一つとなっており, 2つのアームは同時に駆動される.

実験の構成

VR 環境下における手持ち物体の位置と現実世界のコントローラの位置を一致させるため, トラッキングシステム (Optitrack) を用いた. VR 環境下に, Transcalibur と同じ円柱型の持ち手に, ユーザが VR 環境下で長さ・幅を自在に変えることのできる厚さが 5[mm] の四角形が取り付けられているバーチャル物体を用意した. ユーザはゲームパッドを用いて幅と長さを自由に変更することができるようになっている.

ユーザは Transcalibur を用いて形状分布が与えられたあと, その形状にもっとも適すると感じられる VR 物体の形状になるまでゲームパッドを用いて VR 物体の形状を調整する. VR 物体の形状は最初, 100[mm] × 100[mm] の正方形となっている. 調整が終わったところで, ユーザは形状を確定させるボタンを押すことができる. この手順を 1 試行とする.

今回の実験では, 素材の見た目による形状知覚の違いを統制するため, VR 環境内の物体の形状をアクリル製とした. そのため, Transcalibur のアームの代わりに,

100[mm] × 100[mm] の正方形で厚さが 5[mm] のアクリル板を取り付けた統制用コントローラを別に用意し、常にユーザが Transcalibur と比べられるようにした。

実験中、Transcalibur は、Angular Mechanism が 0 度から 90 度までの 5 段階の角度 θ に、また Weight Shifting Mechanism はアームの回転中心から 40mm から 125mm までの 5 段階の位置 p に、各試行ごとにランダムな順番で形状を変える。すなわち、実験参加者一人あたりの試行回数は 25 回となる。

実験参加者は、男性 4 人、女性 1 人の合計 5 人で、平均年齢は 22 歳であった。

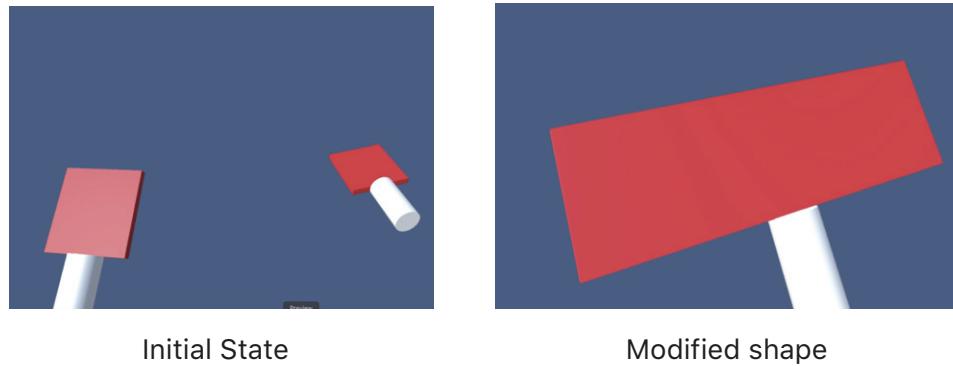


図 3.7: 予備評価実験の VR 空間に提示される VR 物体。初期形状(左)に対して、ユーザがゲームパッドで調整した形状(右)。

実験結果

本実験で得られた、重りの位置と角度 p, θ と、それに対応する VR 上で知覚された形状の幅と長さ w, l のデータ対(125 点)をプロットして示し、最小二乗法で回帰したものを図 3.8 に示す。回帰の結果から、本実験の条件下では Transcalibur は幅が約 5[cm] から約 40[cm]、長さが 5[cm] から約 25[cm] に渡る形状を知覚させられることが示された。ユーザからの自由記述のフィードバックとして「形状がかなり変わって感じられた」「幅方向の形状変化が強く感じられた」といったものが寄せられた。次節以降では、実際の VR 体験におけるフィードバックについて詳細な定性的評価を行った結果を述べる。

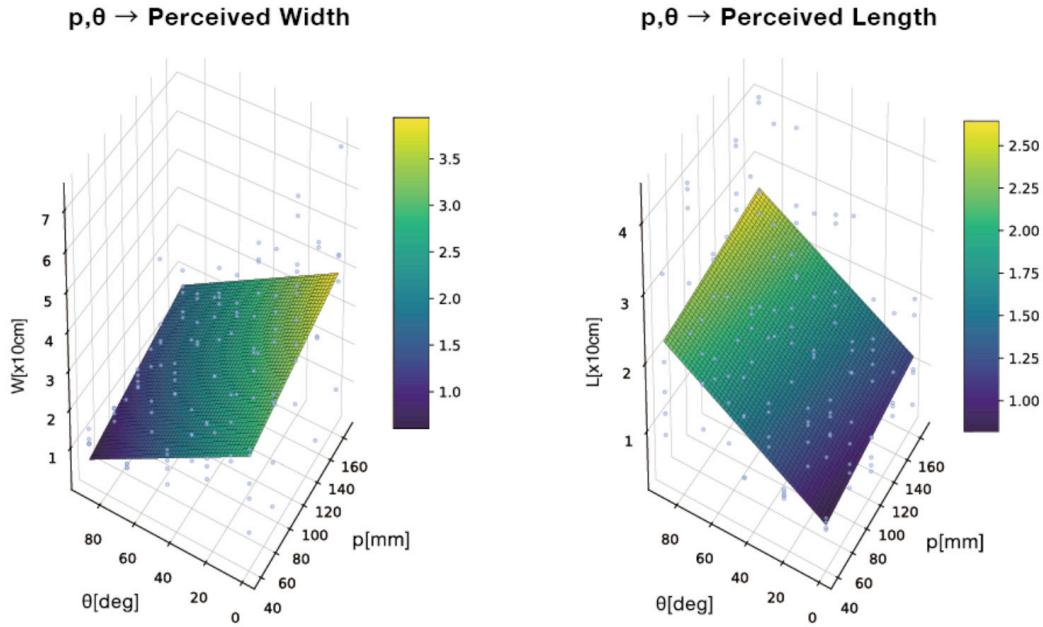


図 3.8: 予備評価実験の結果. グラフは VR 物体の幅と高さ方向とコントローラの重りの位置・角度パラメータの対応データを線形回帰したものを見たす.

3.2.2 インタラクティブデモ

Transcalibur を実際に VR アプリケーションに応用した例を示す目的で、VR 空間中で巨大なドラゴンと戦う体験のデモ展示を、コンピュータグラフィックスとインタラクティブテクノロジー分野最大の学会である SIGGRAPH2018 のインタラクティブデモ : Emerging Technology にて展示した。

デモのアプリケーションをとして、剣→盾→銃と変形していく武器を用いて、ドラゴンを攻撃したり、ドラゴンの攻撃から身を護るなどの体験ができるゲームを実装した。図 3.9 にアプリケーションと展示の様子を示す。4 日間に渡る展示では各国から 200 人以上がブースを訪れてデモ展示を体験し、その後に任意で、物体変形の感覚やアプリケーションに関する簡単なアンケート調査を行った。アンケートの有効回答数は 199 件、有効回答数における平均年齢は 32.0 であった。

アンケートの内容として、以下の事項を尋ねた。

1. Q1: I perceived the change of wielding object (手に持った物体が変形したの

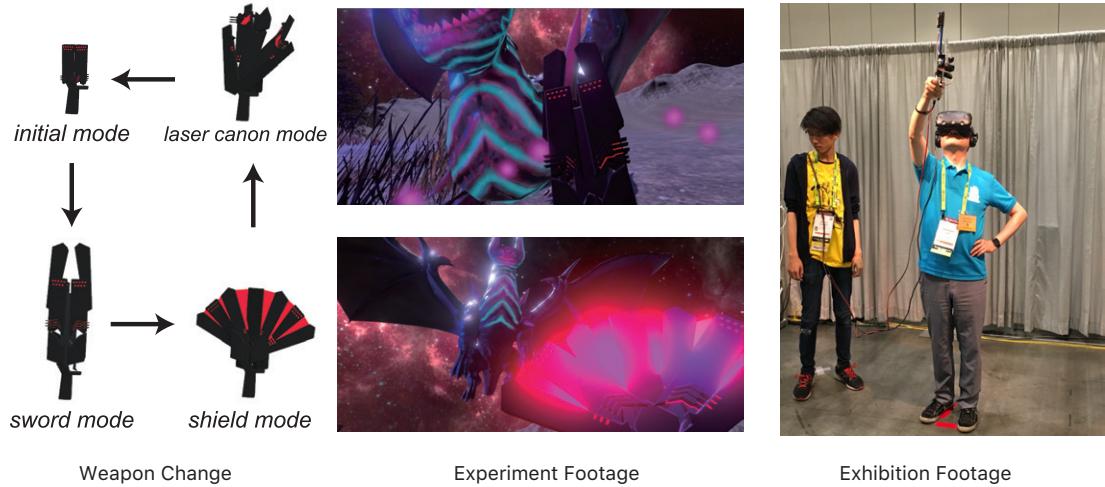


図 3.9: Transcalibur のデモ展示. 左の図はドラゴンとの戦闘に用いる武器の変形. 中央の図はVR体験のスクリーンショット(中央上: ドラゴンを sword mode の武器で攻撃, 中央下: ドラゴンの攻撃から shield mode の武器で防御). 右の図は実際のデモ展示の様子.

を感じられた)

2. Q2: The wielding object matched the mass property of the controller (手に持った物体は、コントローラの重量分布と一致していた)
3. Q3: The controller helped me immerse in VR (コントローラのおかげでVR体験の没入感があった)
4. Q4: The controller helped me feel real (コントローラのおかげでVR体験がリアルに感じられた)
5. Q5: I felt the change of shape in width (幅方向の形状変化を感じた)
6. Q6: I felt the change of shape in height (高さ方向の形状変化を感じた)
7. Q7: I enjoyed the battle with a dragon (ドラゴンとの戦いを楽しんだ)

以上7件の質問をリッカート7尺度(1:Completely Disagree - 7:Completely Agree)

第3章 Transcalibur:重量分布変化による形状提示 VR コントローラ型デバイス44

で測定したことに加え、任意の自由記述欄を用意した。図3.11に、アンケート結果の平均値を示す。

<p>Q1 I perceived the change of welding object *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7</p> <p>Completely Disagree <input type="radio"/> Completely Agree</p>	<p>Q5 I felt the change of shape in width (change in right / left) *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7</p> <p>Completely Disagree <input type="radio"/> Completely Agree</p>
<p>Q2 The welding object matched the mass property of the controller *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7</p> <p>Completely Disagree <input type="radio"/> Completely Agree</p>	<p>Q6 I felt the change of shape in height (change in up / down) *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7</p> <p>Completely Disagree <input type="radio"/> Completely Agree</p>
<p>Q3 The controller helped me immerse in VR experience *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7</p> <p>Completely Disagree <input type="radio"/> Completely Agree</p>	<p>Q7 I enjoyed the battle with a dragon *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7</p> <p>Completely Disagree <input type="radio"/> Completely Agree</p>
<p>Q4 The controller helped me feel realistic in VR *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7</p> <p>Completely Disagree <input type="radio"/> Completely Agree</p>	<p>Other thoughts on the experience</p> <p>Long-answer text: _____</p>

図3.10: Transcalibur のデモ展示に用いた任意アンケートの質問表 (iPad 上の Google Form にて回答)。

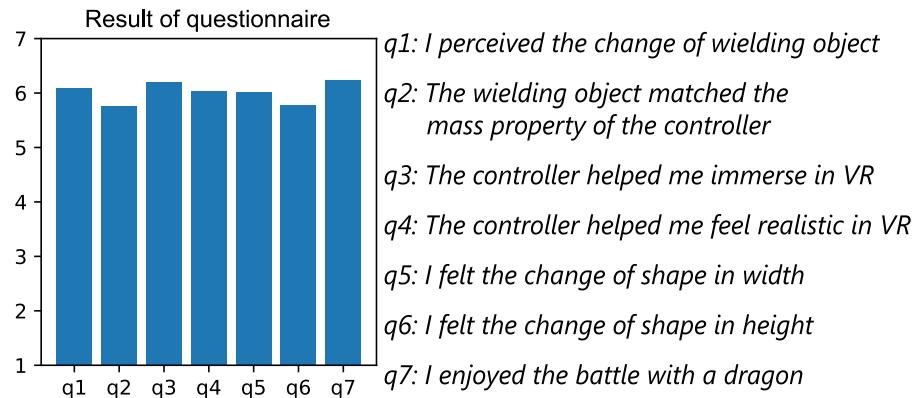


図3.11: アンケートの結果 (平均値)

また、自由記述の結果として以下のようなものが得られた。

1. デフォルト状態を経由するとより感じやすい気がしました。デフォルトに戻ると、軽く、幅狭く短くなつたと感じやすいですが、広くなつたり長くなつてゐる感じは少し希薄でした。しかしビジュアルの助けもあり、体験は満足のいくものでした。
2. I absolutely loved the change in the weapon's weight. It made me want to charge the dragon
3. I even felt the temperature
4. I think I forgot the weight change after a while. Why not very slowly change to previous form and give the illusion of multiple change?
5. The laser cannon had the most believable Weight distribution

上記の意見に加えて「アニメーションと重量位置変化を組み合わせることでも錯覚を増強できるのでは」という意見が複数寄せられた。以上の予備評価実験やデモの結果より、Transcalibur は単一のコントローラで様々な幅・長さの形状を知覚させられる形状提示デバイスとして機能することが示された。

3.3 本章のまとめ

本章では、Transcalibur のプロトタイプ設計・実装について技術的な詳細について述べた。また予備評価実験と SIGGRAPH におけるデモの結果に基づいて、本デバイスが様々な幅・長さの形状を知覚させられる事のできる VR コントローラとして機能したことを示した。一方で、本章で述べたデモアプリケーションでは、提示した VR 物体の形状に対して手動で Transcalibur の重りの位置や角度を求めていた。Transcalibur の表現可能な重心分布に加えて、視覚的効果による形状知覚の変化 : Haptic Shape Illusion を考慮した上で、狙った VR 形状に対して最適な重りの位置・角度を求めることで、あらゆる VR 形状の提示が可能かを評価する必要がある。加えて、Transcalibur の重量分布は時間的に変化できる。将来的に広く展開可能な VR コントローラとして、ハードウェアを簡略化する方向を見据えた際に、視覚効果がダイナミックな形状変化に及ぼす影響を定量的に評価し、Transcalibur がわずかに

第3章 Transcalibur:重量分布変化による形状提示 VR コントローラ型デバイス46

変形しただけでも形状知覚の変化を提示できるかを調査する必要もある。本章で述べたデモンストレーションで得た知見やユーザからのフィードバックを踏まえ、次章以降ではこれら2点について、知覚モデルの定義・データドリブンな手法による構築と、実験による評価によって調査する。

第4章

静的2次元物体の計算機的知覚モデル の実験

前節では、第3章で述べた Transcalibur によって広い範囲の幅・高さの VR 物体の形状感覚を提示できることを示し、デモ展示を通して定性的な評価を行った。結果として、Transcalibur は一つのコントローラで多様な形状を提示できることが示された。

一方、Transcalibur で実際の VR 形状の物理パラメータをシミュレートするだけではなく、視触覚相互作用によって得られる錯覚現象: 第2章に示した Haptic Shape Illusion を応用し、コントローラの形状の制約を超えた物体の形状感覚を与えるという作業を人間の手で行うことは、錯覚現象を扱う故に一般的に難しい。

本章・次章ではその手続きを自動化するシステムを構築するためのモデル構築実験について述べる。Transcalibur を用いて、計算機的知覚モデル: Computational Perception Model に基づき、定量的に様々な形状を提示するためのシステムとその実証実験について述べる。4.1節では実験の目的を述べ、4.2節ではデータ収集実験について、4.3節では知覚モデルの構築について、4.4節では知覚モデル評価実験について述べる。

4.1 実験の目的

本実験の目的は、VR 空間における視覚刺激と Transcalibur による触力覚を用いて様々な形状を知覚させるための数理モデルの構築と、それに基づいた Transcalibur の重量位置パラメータの最適化システムの評価である。実験は、「実験1:データ収集実験」と、「実験2:モデル評価実験」の2つに分けられる。

図4.1は、静的2次元物体の知覚モデルによる形状提示のアプローチを示す。本章の実験で構築する知覚モデルは、VR 内の見た目による影響と、手から感じられる触覚を知覚の過程で統合されるプロセスを含めて構築する。すなわち、Transcalibur からの触覚と VR での見た目という刺激の対応を取り、Haptic Shape Illusion を加味した上で、狙った VR 形状を提示するための適切な触覚刺激を得る計算手法を構築する。これにより、VR アプリケーションをデザインする上で、錯覚現象といった複雑な現象を考えることなく、豊かな触覚体験をユーザに提供できると考える。また、知覚モデルを評価する上で、コントローラが錯覚現象をどの程度利用できるか、VR 形状の視覚刺激が触覚に与える影響なども知ることができる。

次節以降、知覚モデルの構築のためのデータ収集実験、モデルの構築・評価実験について詳細を述べる。

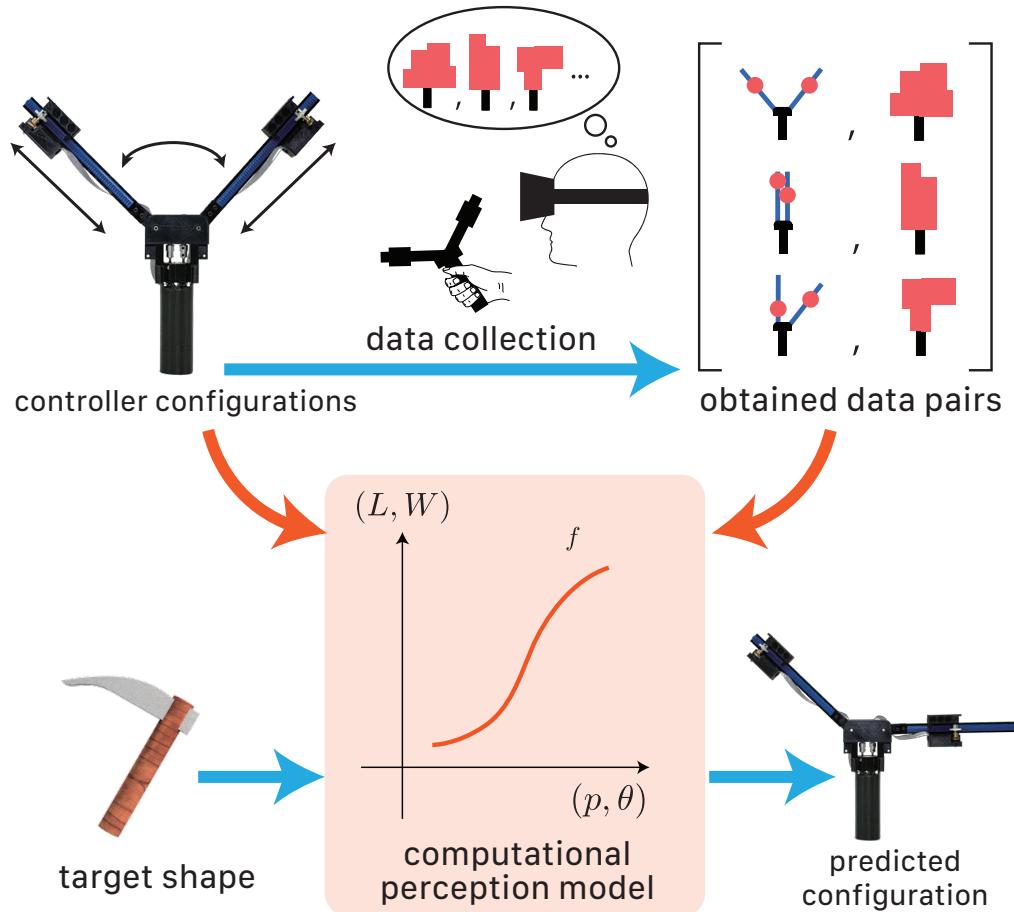


図 4.1: Transcalibur による知覚モデルを用いた静的2次元物体の形状提示のアプローチ

4.1.1 データ収集実験の目的

データ収集実験では、知覚モデル構築のための、「VRにおける2次元物体形状」と、「Transcaliburの重量位置・角度パラメータ」のデータ対を収集することを目的とした。また前章で述べた予備評価実験に対し、本実験では高さ・幅方向の双方に非対称な物体形状に対応するためのデータフォーマットを定めた。また、収集した

データに基づいて、知覚的に最適な重量位置を与える回帰モデルを構築した。

4.1.2 モデル評価実験の目的

モデル評価実験では、前節で述べた回帰モデルが、あらゆるVR形状に対して、生成したコントローラの重量分布が適しているかを評価することを目的とした。10種の異なるVR物体の形状と、それに対応した最適重量分布が与えられた上で、それぞれの識別精度を測定する実験を行い、構築したシステムを評価した。

4.2 実験1:データ収集実験

実験1では「VRにおける2次元物体形状」と、「Transcaliburの重量位置・角度パラメータ」のデータ対を収集した。実験は、ユーザが見た目と触覚が同じと感じられるまで刺激を調整することのできる、調整法の手順に沿って行った。

4.2.1 実験のシステム構成

実験システムはVR物体と地平以外に何も表示されていないVR空間と、VIVEヘッドマウントディスプレイ(HMD)とユーザ入力用のゲームパッド(Sony PlayStation DUALSHOCK 4), Transcalibur本体とTranscaliburをトラッキングするためのVIVEトラッカーからなる。VR空間のレンダリングにはintel COREi7-6700@3.40GHzプロセッサとNVIDIA GeForce GTX 1080グラフィックプロセッサを搭載したノートPC(iiyama社 LEVEL8)を用いた。

VR空間とバーチャル物体の構成

VR空間では、現実空間のTranscaliburと同じ位置になるように、バーチャルな把持物体(VR物体)を表示させた。VR物体は、Transcaliburのハンドルと同じ直径の白い円筒と、その先に厚さ10mmの赤い多角形を取り付けた形状をしている。この赤い多角形は4つの四角形からなっており、ユーザはゲームパッドを用いてこれら4つの四角形の幅・高さを別々に変更できるようになっている。視覚情報を統制

するため、VR空間にはVR物体以外の物は表示しないようにした。図5.2にVR物体と使用したゲームパッドについて概略を示す。

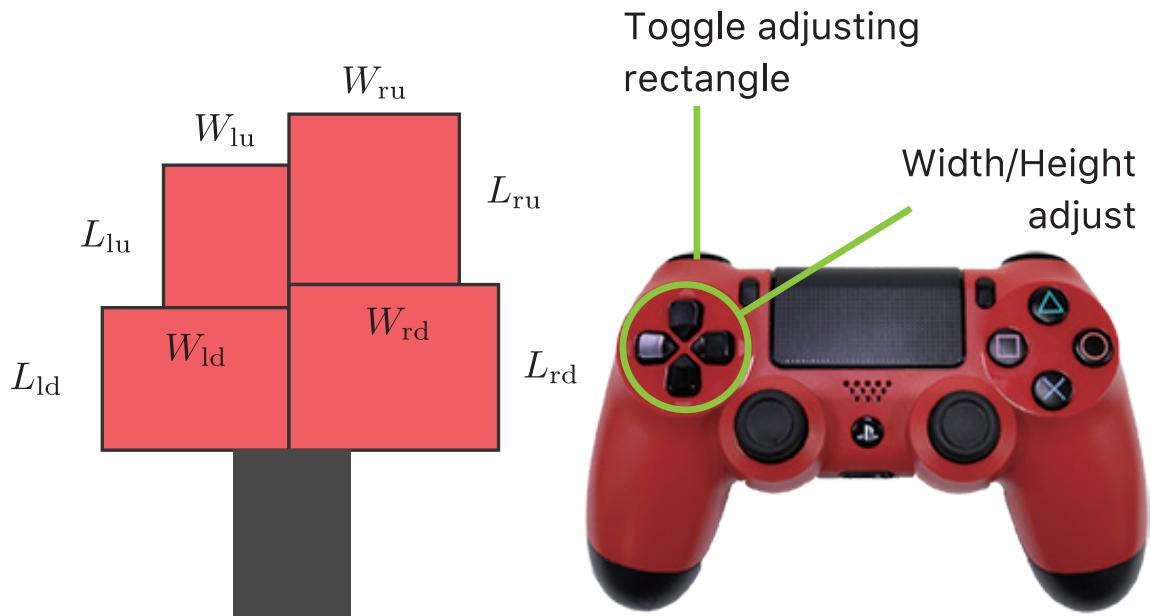


図4.2: VR物体(左)とゲームパッド(右)。ゲームパッド(Playstation DUALSHOCK 4)のコントローラーの方向キーを用いて形状を調整し、トリガーボタンを押すことで変形させたい形状を選択する。

今回の実験ではVR物体の比重をアクリルと等しいと仮定した。そのため、予め実験参加者に提示するための参照用VR物体として、Transcaliburのアームの代わりに $100 \times 100[\text{mm}]$ の大きさのアクリル板を取り付けたものと、それに追従する $100 \times 100[\text{mm}]$ の形状のVR物体を設けた(以下Ref-VR物体と称する)。

現実空間の構成

実験参加者を椅子に座らせ、利き手にTranscaliburを持たせ、利き手とは反対の手でゲームパッドを持たせた。実験の様子を図4.3に示す。

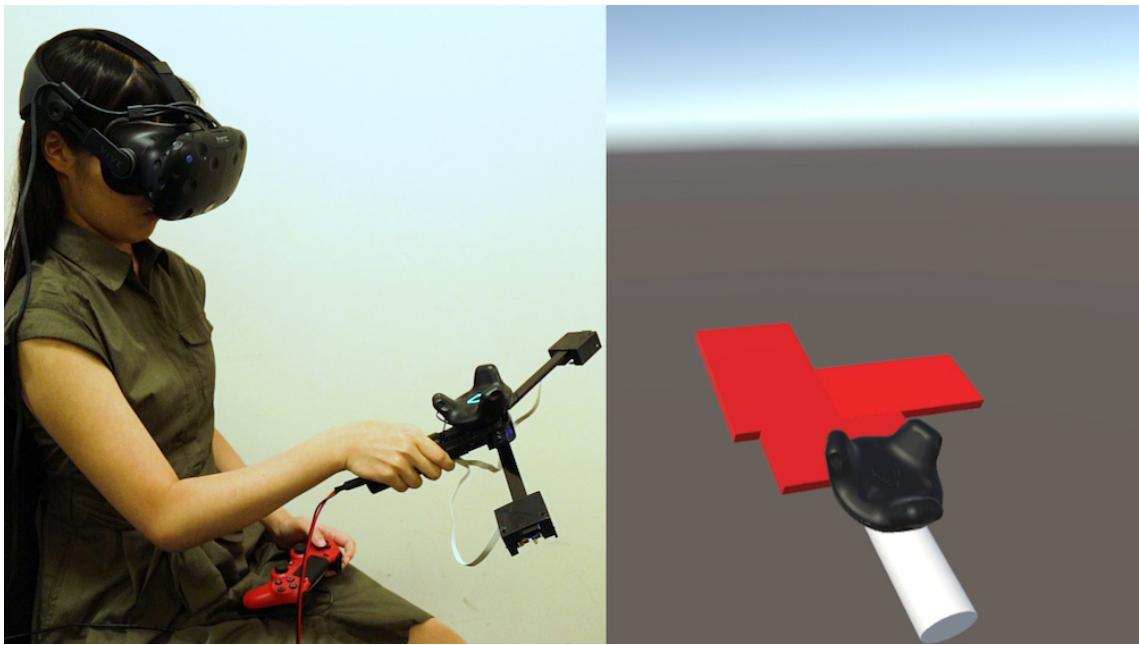


図 4.3: 現実空間の構成。ユーザは HMD を装着した状態で、利き手に Transcalibur を、その反対の手にゲームパッドを手に取った状況で実験をする(左)。VR 空間に、ユーザが大きさを指定可能な赤い VR 物体と、VIVE トラッカー・取っ手のモデルを表示したものが投影される(右)。

4.2.2 調整法による重量分布-VR 形状のデータ対収集タスク

手に持った Transcalibur を通じて感じられる形状知覚と、それに対応する VR 物体の形状とのデータ対を収集するために、調整法によるデータ収集タスクを課した。実験参加者は、HMD を装着して VR 物体を見ている状態で、VR 物体の形状を手に持った物体の形状知覚と合致するように調整し、これを規定回数繰り返すことで、知覚モデルを構築するためのデータ対を収集する。

タスクの前提条件として、データを収集する上で実験参加者に提示する Transcalibur の重量分布は 28 種類を事前に用意した。アームの角度を $\theta \in 90, 45, 0[\text{deg}]$ 、重りの位置を、アームの根本から $p \in 0, 60, 120[\text{deg}]$ とした。なお $p = 0[\text{mm}]$ は $\theta = 45[\text{deg}]$ の時のみ用いた。これらを合計すると左右対称のものを除いて合計で 28 通りとなる。

調整法の初期形状が知覚に与える影響を統制するために、試行ごとに始めに提示

するVR物体の大きさを， $100 \times 100[\text{mm}]$ と $600 \times 600[\text{mm}]$ の2種類とした。各形状ごとに2種類の初期形状があるため，先に述べた重りの位置の種類と組み合わせて，1参加者あたり56試行分のパターンを用意した。

4.2.3 実験の手順

実験参加者に実験に関する説明をしたのち，椅子に着席し，HMDを装着させた状態で実験を開始した。4.2.2節に示したタスクを14試行するごとに，2分間の休憩を設けた。

実験参加者は20歳から23歳の男女で，一人は左利きであった。また実験終了後に謝礼としてアマゾンギフトカード1000円分を支払った。

4.2.4 収集データの後処理

モデルの精度向上のため，収集したデータはデータセットのサイズを拡張するために，左右非対称のものについて，それらを反転させたデータをデータセットに加える処理をし，合計で588のデータ対を得た。

4.3 知覚モデルの構築

実験1で得たデータセットを用いて，VR形状を与えることでそれに最適な重りの位置・角度を与える計算機的知覚モデルを構築した。

4.3.1 知覚モデルの定義と学習

ユーザが手に持った物体が，VR空間内の形状としてどのように知覚されるか，という対応を取り，知覚モデルを定義する。知覚モデル f を，Transcaliburの重りの位置・角度を示す物理パラメータ ϕ と，ユーザのVR内での形状知覚 ψ を対応付ける関数を

$$f : \phi \rightarrow \psi \quad (4.1)$$

とする。

Transcalibur の左右の重りの位置 p ・角度 θ を用いて $\phi = (p_r, \theta_r, p_l, \theta_l)$ と定める。また VR 内での形状知覚を、知覚形状全体の高さ H ・幅 W と、縦・横方向の重心位置 G (Center of Gravity: CoG) を用いて $\psi = (H, W, G_x, G_y)$ と定める。構築した知覚モデル f から、VR 内で提示したい形状 ψ を用いて、最適な Transcalibur の重り位置のパラメータ ϕ を推論する回帰問題を解く。

4.3.2 モデルの線形回帰による知覚形状の推論

前項で述べた知覚モデル式 4.1 に基づいて、VR 内で提示したい形状 ψ に対するコントローラの重り位置パラメータ ϕ の線形モデルを、以下のように定めた。

$$\psi = f(\phi; \mathbf{A}, \mathbf{b}) \quad (4.2)$$

$$\psi = \phi \mathbf{A} + \mathbf{b} \quad (4.3)$$

ここで $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}, \mathbf{b} \in \mathbf{R}^{1 \times 4}$ をパラメータとして $\phi, \psi \in \mathbf{R}^{1 \times 4}$ である。

構築したモデルから、Transcalibur によって提示したい形状 ϕ がユーザに知覚されるための Transcalibur の形状パラメータを求める。具体的には、誤差関数を

$$E = E_H + E_W + E_{G_x} + E_{G_y} \quad (4.4)$$

とし、ここで、

$$E_H = \|f_H(p_r, \theta_r, p_l, \theta_l) - H^{\text{target}}\|^2 \quad (4.5)$$

$$E_W = \|f_W(p_r, \theta_r, p_l, \theta_l) - W^{\text{target}}\|^2 \quad (4.6)$$

$$E_{G_x} = \|f_{G_x}(p_r, \theta_r, p_l, \theta_l) - G_x^{\text{target}}\|^2 \quad (4.7)$$

$$E_{G_y} = \|f_{G_y}(p_r, \theta_r, p_l, \theta_l) - G_y^{\text{target}}\|^2 \quad (4.8)$$

と定め、誤差関数が最小となるような Transcalibur のパラメータ $(p_r, \theta_r, p_l, \theta_l)$ を Python の Scikit-learn 環境で数値計算(COBYLA Optimizer)によって求めた。これ

は以下のように知覚させたい VR 物体の形状に応じた Transcalibur のコントローラ パラメータを出力する最適化問題に帰結できる:

$$\begin{cases} \phi^* = \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} E \\ s.t. \quad 0 \leq p_r, p_l \leq 125, 0 \leq \theta_r, \theta_l \leq 90 \end{cases} \quad (4.9)$$

本節では、Haptic Shape Illusion に基づく形状提示手法における知覚モデルを定義した。また、知覚モデルに基づいて、提示したい形状に最適な Transcalibur の重りの位置・角度の計算手法を定めた。

次節以降では、実際に学習したモデルによって提示できる形状について、ユーザ スタディなども含めて定量的に評価した結果について述べる。

4.4 実験 2: モデル評価実験

4.3 節では収集したデータを線形モデルに当てはめ、知覚させたい形状に対する最適な Transcalibur のコントローラパラメータを得る手法について述べた。本節ではそのモデルを定量評価やユーザスタディを通して実用性を評価する。

4.4.1 形状提示可能範囲の可視化

式 4.4 及び 4.5 にて述べた損失関数の値 E が少ない値であればあるほど、構築したモデルに対するコントローラのパラメータと知覚されうる結果との乖離が少ないということを示す。図 4.4 は、VR 形状の高さ H と W を変化させた際の損失関数 E を図示したものを示す。本実験の条件下において Transcalibur は実際のコントローラよりも大きい形状の物体を違和感なく提示可能であることを示している。

4.4.2 計算機的知覚モデルによる形状識別率の測定実験

本節では、4.3 において構築したモデルを用いて、様々な形状の VR 物体を提示する際の識別精度を評価する実験について述べる。本実験では、予め用意した 10 通りの異なる VR 形状に対応する、知覚モデルによって推論された Transcalibur の重量

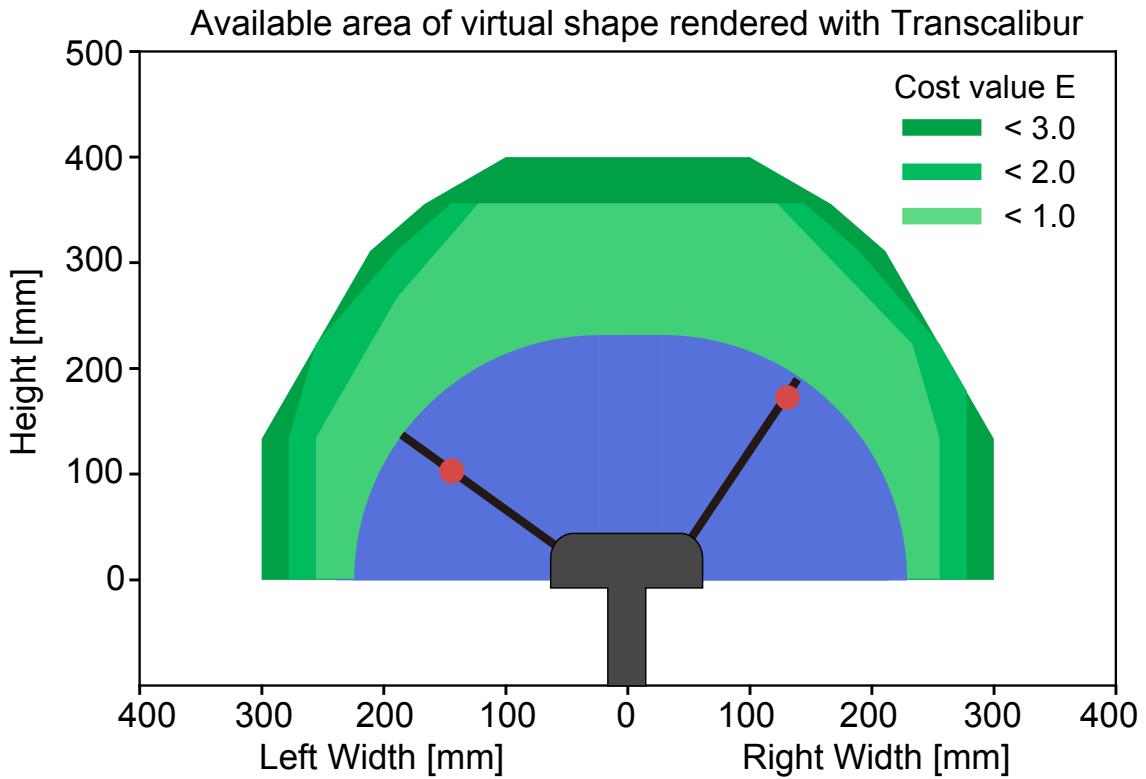


図 4.4: VR 形状の高さ H と W を変化させた際の損失関数 E のプロット.

分布を用意する. 推論された Transcalibur の重量分布の 1 つをユーザに提示した際, その形状のうちどの見た目が提示された触覚に最も適しているかを選ぶタスクを課し, 推論された重量分布と VR 形状の対応がどれだけ正しく対応づいているかを調べた. 本実験のシステム構成は 4.2.1 と同様である.

バーチャル物体の構成

バーチャル物体 (VR 物体) は, 予め手動で作成した 10 通りの形状のものを使用した. 図 4.5 に用いた VR 物体の一覧を示す. VR 物体は縦・横・非対称形状といった多様な種類を含むように, かつ実験負荷が過大にならないような数を選定した.

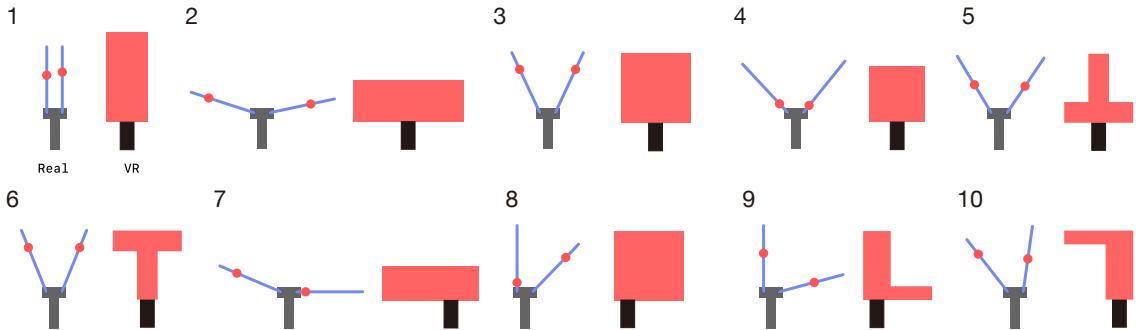


図 4.5: 形状識別実験に用いた VR 物体

実験の手順

4.2 節の実験と同様に、実験参加者は実験の説明の後に HMD を装着し、Transcalibur とコントローラを持たせた。各試行ごとに実験参加者に、図 4.5 に示した VR 形状(右)に対応する Transcalibur(左)を提示した。その際実験参加者はコントローラを用いて、VR 空間内で提示している 10 つの VR 形状を切り替えることができる。実験参加者にはそのうちどの VR 形状が最も Transcalibur の触覚刺激に合致しているかを選ぶタスクを課した。各 Transcalibur の重量分布をランダムな順番で提示し、そのうちから対応する VR 形状を 1 つずつ選ばせた。

実験参加者は 22 歳から 24 歳の男女 12 人で、うち一人が左利きであった

実験結果・考察

図 4.6 に、VR 形状に対する Transcalibur に関する混同行列をプロットしたものを見た。若干の混同が認められた No.4, 5, 8, 9 を除けば、実験参加者は概ね提示したい形状を知覚できていたことがわかる。左右対称な No.1,2,3 は比較的正確に識別された。形状 No.3 は、主に重心位置 G_y に違いのある No.5,6 との混同があった。非対称形状である No.7,8,9,10 も比較的高い精度で識別されたが、No.8,9 において若干の混同があった。

この実験で生じた混同のうち、特に G_y の変化があるものは、先行研究 [61] の結果に述べられているように、見た目の高さが似ているものと重心が僅かに異なるものを識別しづらかったものが原因で生じたと考えられる。また、実際のデータ収集

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	83	0	0	4.2	4.2	4.2	0	0	0	4.2	
2	0	83	0	0	4.2	0	8.3	4.2	0	0	
3	12	0	54	4.2	4.2	21	4.2	0	0	0	
4	8.3	0	8.3	38	33	4.2	4.2	0	0	4.2	
5	4.2	8.3	29	12	12	21	4.2	8.3	0	0	
6	12	4.2	25	0	0	46	0	4.2	4.2	4.2	
7	0	12	0	0	0	0	88	0	0	0	
8	4.2	0	0	0	0	0	4.2	46	46	0	
9	0	0	4.2	0	0	0	0	25	71	0	
10	0	8.3	4.2	0	4.2	0	25	0	0	58	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

Actual target shape
Answered shape by the participants

図 4.6: 形状識別実験の結果. 縦軸が提示した触覚に対応する形状, 横軸がユーザから得た回答を示す.

実験で, ユーザから得られにくい形状が, 混同していたデータに含まれていた可能性も考えられる.

今回の実験では VR 形状の対称性によるコントローラパラメータの生成に制約を設けていない (VR 形状が左右対称であれば, 必ずコントローラも左右対称になるようにするなど) ため, より詳細な物理条件を定めることでモデル精度の向上が見込める.

以上をまとめると, 本実験条件では, 若干の混同は認めつつも, 大方の形状は高い精度で知覚されており, Haptic Shape Illusion を利用した Transcalibur による様々な形状提示が可能であることが示された.

4.5 本章のまとめ

本章では、静的2次元物体の計算機的知覚モデルの実験について述べた。データ収集実験では、Transcaliburからの触覚刺激に対するVR形状の見た目のデータ対を収集し、それをもとに線形モデルを定義・構築した。続いて構築したモデルによって形状の識別精度を評価する実験を行い、その有効性を示した。

一方で、Transcaliburの真価として、モーター駆動による重りの移動速度も制御することが可能であることが挙げられる。Fujinawa et al. らの手持ちコントローラのファブリケーション手法 [57] では1つのコントローラに対して静的な形状提示が1つであった。Zenner et al. らの Shifty [14] では、アニメーションを用いた際にリアリズムが最も向上することが示された。加えて、3章で述べたように、アニメーションに合わせてVR形状が変化した際に、強く形状変化を知覚させられたことも示唆された。重量分布の時間的变化にあわせてVR形状が変化した際の形状知覚を定量化し、僅かな重量分布の変化でも違和感なく形状変化を知覚させられれば、表現できるVR触力覚の幅が大きく広がる。次章では、時間に応じて動的に変化する物体の形状を Transcalibur で提示するための計算機的知覚モデルの実験・評価について述べる。

第5章

動的2次元物体の計算機的知覚モデル の実験

前章では、静的な2次元VR形状の知覚モデルを定義・構築し、データ収集実験を通してそのモデルパラメータを学習させた。また、モデルの学習結果を誤差関数を用いて評価し、知覚モデルを用いたTranscaliburにおける静的物体のHaptic Shape Illusionの効果を示した。

本章では、形状の見た目の時間的变化に合わせて、Transcaliburの形状を変化させた際に生じるダイナミックな形状変化に対応させた知覚モデルを構築し、その有効性について検証する。5.1節では実験の概要・目的について、5.2節ではデータ収集実験、5.3節ではモデルの構築、そして5.4節ではモデルの評価実験について述べる。

5.1 実験の目的

本実験の目的は、VR形状の動的な変化に合わせてTranscaliburの動的な重量分布変化を提示する際に、Transcaliburの変形量がどの程度小さくても違和感なく形状変化を提示できるかを評価することである。実験は前章同様、「実験1:データ収集実験(5.2節)」と、「実験2:モデル評価実験(5.4節)」の2つに分けられる。3.2.2節に述べたとおり「アニメーションと重量位置変化を組み合わせることでも錯覚を増強できるのでは」という意見が、様々なデモを通じて多数得られた。加えて、Zenner et al.による一次元の重量移動VRコントローラ[14]においても、変形アニメーションと合わせて触覚を提示した条件下でのリアリズムが最も高いという結果が得られている。

この仮説が正しければ、物体の変形アニメーションに合わせてTranscaliburをわずかに変形させるだけで、強い形状変化に関する知覚を得られると考える。またこの知覚モデルに関する知見が得られれば、変形触覚デバイスのさらなる効率化が実現し、ダイナミックな形状変化と見た目の影響という複雑な現象を考えることなく、簡易なアクチュエーションだけで幅広い形状提示表現が可能となる。

図5.1は、動的2次元物体の知覚モデルによる形状提示のアプローチを示す。異なる二種類の形状に対して、前章のモデルで構築した静的モデルから生成した最適パラメータがあるとする。ある形状が他の形状に時間的に変形していくアニメーションに合わせ、Transcaliburが一方から他方へ変形することを考える。このとき、Transcaliburの変形度合いがどの程度までなら、ユーザが「違和感なく変形した」と

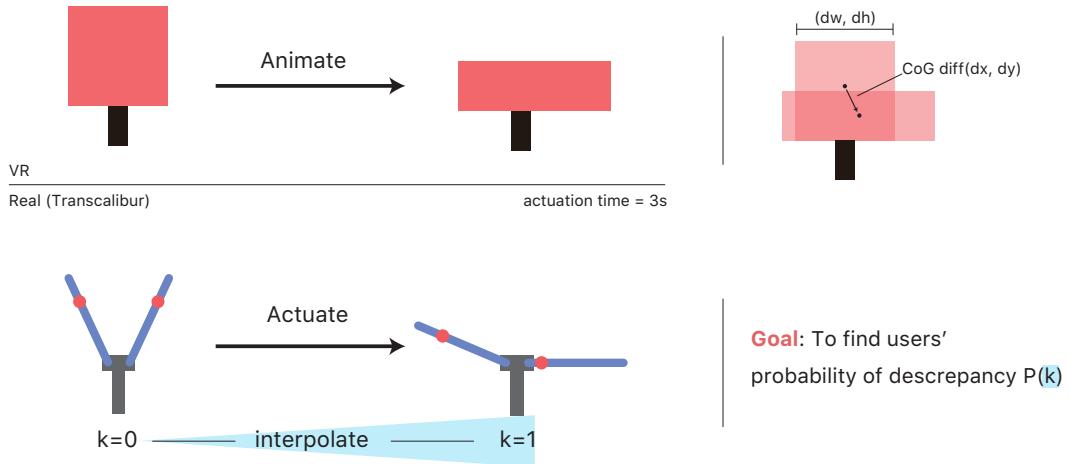


図 5.1: Transcalibur による知覚モデルを用いた動的2次元物体の形状提示のアプローチ

知覚するかを調べる。このとき、変形量を $k \in [0, 1]$ に対して、違和感の生起確率をモデリングし、用途に合わせて適切な変形量をデザインできる知覚モデルを構築する。

次節以降、動的形状変形の知覚モデルの構築のためのデータ収集実験、モデルの構築・評価実験について詳細を述べる。

5.1.1 データ収集実験の目的

データ収集実験では、知覚モデル構築のため、2形状間の変形アニメーションに対応した Transcalibur の重量分布変化量に対する違和感の生起確率を収集することを目的とする。また、収集したデータに基づいて、任意の変形量に対してユーザの違和感の生起確率を求める知覚モデルを構築した。

5.1.2 モデル評価実験の目的

モデル評価実験では、構築した知覚モデルが、物体の変形アニメーションに対して正しく知覚できているか調べるための評価を目的とする。4種の異なる VR 物体

の形状と、それに対応した最適重量分布が与えられた上で、それぞれの違和感生起確率を測定する実験を行い、構築したシステムの評価を行った。

5.2 実験1:データ収集実験

2形状間の変形アニメーションに対応したTranscaliburの重量分布変化量に対する違和感の生起確率を収集した。実験は、ユーザが見た目と触覚に齟齬を感じたかどうかを回答させる、強制二者択一法(2AFC: Two alternative forced choice)で行った。

5.2.1 実験のシステム構成

実験システムはVR物体と地平以外に何も表示されていないVR空間と、VIVEヘッドマウントディスプレイ(HMD)とユーザ入力用のゲームパッド(Sony PlayStation DUALSHOCK 4), Transcalibur本体とTranscaliburをトラッキングするためのVIVEトラッカーからなる。VR空間のレンダリングに用いた機器は4章で用いた環境と同様である。

VR空間とバーチャル物体の構成

VR空間では、現実空間のTranscaliburと同じ位置となるように、バーチャルな把持物体(VR物体)を表示した。以下、VR空間内に表示させる物体は前章の実験と同様である。一方、本実験では各試行ごとに「変形に違和感があった」かどうかを尋ねるダイアログが、ユーザの座っている方向の前方に表示され、利き手と反対側に持ったゲームパッドを用いて回答させた。

5.2.2 現実空間の構成

前章と同様に実験参加者を椅子に座らせ、利き手にTranscaliburを持たせ、利き手とは反対の手でゲームパッドを持たせた。実験の様子を示した図を5.3に示す。



図 5.2: VR 物体(左)とゲームパッド(右). ゲームパッド(Playstation DUALSHOCK 4)のコントローラーの方向キーを用いて形状を調整し, トリガーボタンを押すことで変形させたい形状を選択する.

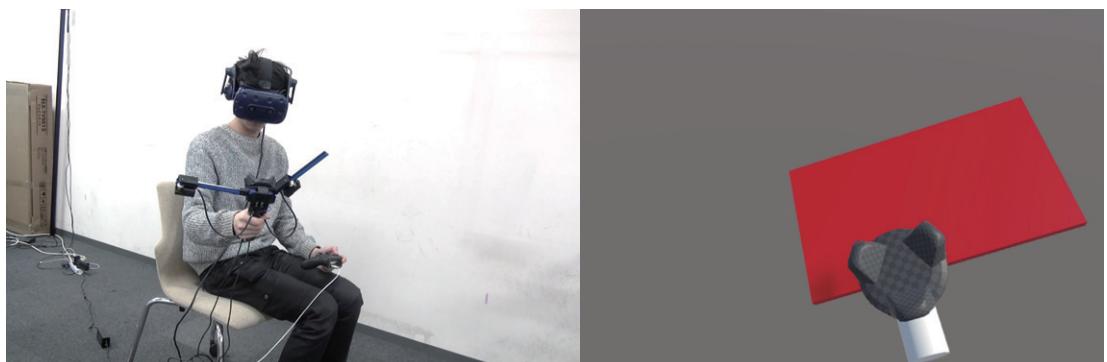


図 5.3: 現実空間の構成. ユーザは HMD を装着した状態で, 利き手に Transcalibur を, その反対の手にゲームパッドを手に取った状況で実験をする(左). VR 空間に, VR 物体の変形アニメーションが表示され, それに合わせて Transcalibur が変形する. 変形後, VR 空間にダイアログが現れ, ゲームパッドを用いて違和感の有無を回答する.

5.2.3 2AFC法による違和感生起率測定タスク

本実験のタスクとして、ユーザが見た目と触覚に齟齬を感じたかどうかを 2AFC 法で回答させた。図 5.4 にデータ収集実験に用いた VR 物体の一覧を示す。また、表 5.2.3 にそれぞれの VR 形状のパラメータと、対応する Transcalibur のパラメータを示す。

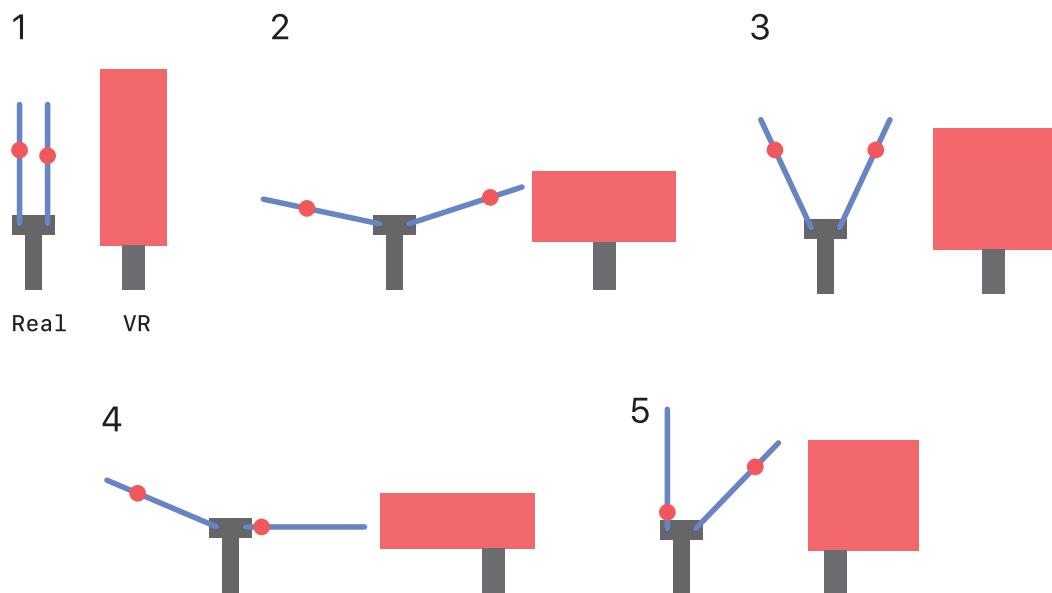


図 5.4: 実験 1 に用いた VR 形状のパラメータ (H から W_l) と対応する Transcalibur パラメータ (p_r から θ_l) の一覧。

それぞれの形状、また対応する Transcalibur のパラメータを、 $T = 5[\text{秒}]$ で、線形に変化させる。つまり、ユーザからは 5 秒でなめらかに変化する VR 物体が見え、持っている Transcalibur から 5 秒でなめらかに変化する触力覚が得られる。ここで、Transcalibur の変化量を、開始時点から最後まで変化するまでの割合として $k \in [0, 1]$ 値を定める。つまり、 $k = 0.5$ の場合、5 秒間で Transcalibur は変化先の対応する VR 形状のパラメータまでの変化量の 50% まで変化し続けるということを表す。

k が多ければ多いほど、ユーザは十分に変化を感じ取ることができ、逆に k が小さいと、ユーザは力覚からは変化を感じ取れず、違和感を生起する。一方で、VR 空

Shape ID	H	W	W_r	W_l	p_r	p_l	θ_r	θ_l
1	325	150	75	75	103	93	90	90
2	150	400	200	200	106	125	12	18
3	275	275	137.5	137.5	125	125	65	65
4	125	350	100	250	0	125	0	23
5	250	250	200	50	125	0	46	90

表 5.1: 実験 1 で用いた VR 形状と Transcalibur パラメータの値一覧.

間内では視覚的に VR 形状が変形しているため、これが触覚に影響を及ぼす事が考えられる。この状況下で、 k の値に応じてどれだけ違和感が生じたかを評価する、 k は $\{0.25, 0.5, 0.75, 1.0\}$ の 4 種類を選定し、各 VR 形状間のすべての変形パターン ($5 \times 5 - 5$) に対して、実験参加者あたり 80 パターンを提示する。

VR 形状は試行ごとに 2 秒間静止状態のものが表示され、その後 5 秒間かけて手持ちの Transcalibur に合わせてなめらかに変形する。その後、VR 空間ににおいてユーザの真正面に「手に持った物体が、違和感なく変形しましたか?」というダイアログが表示される。ユーザは Transcalibur とは反対の手に持ったゲームパッドを用いて、「変形に違和感があった」か、「違和感なく変形した」かを選択する。ここまで手順を 1 試行とする。

5.2.4 実験手順

実験参加者に実験に関する説明をしたのち、椅子に着席し、HMD を装着させた状態で実験を開始した。5.2.3 節に示したタスク 40 試行ごとに、5 分間の休憩を設けた。実験参加者は女性一人を含む 6 人で、うち一人は左利きであった。また実験終了後に謝礼として Amazon ギフトカード 1000 円分を支払った。本実験によって合計 6 人から有効なデータを合計 640 点得た。

5.3 知覚モデルの構築

本実験におけるコントローラの変化量 k 、に応じて、ユーザが変形に違和感があつたと感じる確率をモデリングする。

5.3.1 知覚モデルの従属変数

VR形状の見た目の変化について、図5.1右上に示すように、重心の x, y 座標、高さ・幅の変化量を、それぞれ独立変数として

$$\delta g_x, \delta g_y, \delta H, \delta W \in \mathbb{R} \quad (5.1)$$

とする。すなわち、違和感生起確率に寄与する独立変数は、変化量 k を含めて5つとなる。ここで、これらの変数を合わせて、それぞれ

$$\mathbf{x} = (k, \delta g_x, \delta g_y, \delta H, \delta W)^T \quad (5.2)$$

$$(5.3)$$

とベクトル表記で定める。

5.3.2 知覚モデル：違和感生起確率関数の定義

本モデルでは、関連研究に述べた心理実験 [53, 62] で用いられている違和感の生起に関する確率関数として、以下に示されるシグモイド関数 $\varsigma(\cdot)$ を用いる。

$$\varsigma(t) = \frac{1}{1 + \exp(-t)} \quad (5.4)$$

ここで、式5.2で示したような違和感生起に関わるパラメータを、以下の二次式で表現する。

$$t = \alpha + kw_1 + \delta g_x w_2 + \delta g_y w_3 + \delta H w_4 + \delta W w_5 + \dots \quad (5.5)$$

$$\delta g_x^2 w_{22} + \delta g_y^2 w_{23} + \delta H^2 w_{24} + \delta W^2 w_{25} \quad (5.6)$$

ここで、 w_{ij} で示される実数値を回帰パラメータとする。正負の形状変化に対して、違和感生起確率の凸性を保証するため、形状変化のパラメータのみに対して二次の項を加えた(Transcaliburの重量分布変化の絶対値が大きくなればなるほど、違和感生起確率は低くなることを仮定した)。以上の式を整理して、ある形状変化において、 k を変化させた際の違和感の生起確率は、

$$p(k, \mathbf{x} | \mathbf{w}) = \frac{1}{1 + \exp(-t)} \quad (5.7)$$

と示される。ここで、 \mathbf{w} は多項式の係数をまとめて表現したものと示す。

Parameter	mean	sd	initial prior dist.
w_1	0	0.11	$\mathcal{N}(0, 3.0)$
w_2	0.16	2.67	$\mathcal{N}(0, 3.0)$
w_3	0.09	0.14	$\mathcal{N}(0, 3.0)$
w_4	0.28	1.34	$\mathcal{N}(0, 3.0)$
w_5	1.86	0.15	$\mathcal{N}(0, 3.0)$
w_{21}	0.28	2.86	$\mathcal{N}(0, 3.0)$
w_{22}	-0.34	0.07	$\mathcal{N}(0, 3.0)$
w_{23}	0.01	0.72	$\mathcal{N}(0, 3.0)$
w_{24}	0.32	0.28	$\mathcal{N}(0, 3.0)$
α	-0.58	0.22	Uniform(-5, 0.0)

表 5.2: 実験 1 で収集したデータをもとに pymc で求めたパラメータと、初期事前分布の一覧。生起分布を $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ で示す。

5.3.3 パラメータ分布の予測と上弁別閾の算出

MCMC 法によるモデルの学習

データ収集実験によって得られた k, \mathbf{x} とそれに対応する違和感生起率を用いて、違和感生起確率（式 5.7）のパラメータ \mathbf{w} の分布を求める。式 5.7 で得られた確率関数を用いて、データ k, \mathbf{x} が得られた条件下でのパラメータの分布は、ベイズの定理により、以下のように求められる。

$$p(\mathbf{w}|k, \mathbf{x}) \propto p(k, \mathbf{x}|\mathbf{w})p(\mathbf{w}) \quad (5.8)$$

ベイズの定理に基づけば式 5.8 は、パラメータの事前分布を $p(\mathbf{w})$ 、尤度を知覚モデル: $p(k, \mathbf{x}|\mathbf{w})$ として事後分布 $p(k, \mathbf{x}|\mathbf{w})$ の更新式となっている。式 5.8 は一般に解析的に解くことは難しいため、本実験では得られたデータと予め設定しておいた \mathbf{w} の事後分布に基づいて大量のデータ点をリサンプリングして事後分布を数値計算させる MCMC 法 (Markov-Chain Monte Carlo 法) を用いた。事後分布の計算には Python の MCMC ライブライアリである pymc [63] を用いた。なお、データ点を得られていない $k < 0.25$ の範囲については定義域外とし、知覚モデルは成り立たないものとする。サンプリング数は $N_s = 4000$ 、ブートストラップラウンド数は 2 とした。表 5.2 に、

pymc から得られたパラメータと、学習に用いた事前分布を示す。

なお、pymc におけるリサンプリング処理の収束性については、本論文の付録において詳細を述べる。

モデルの可視化

式5.8 から、更新されたパラメータを用いて $p(k|\mathbf{x}, \mathbf{w})$ を用いることで、与えられたVR 形状変化量 \mathbf{x} におけるコントローラの変化量 k に応じた違和感生起確率を可視化した。図5.5-5.7は、実験1で得られたデータから求めたモデルのパラメータを用いて、python の Matplotlib 環境でプロットしたものを見せる。本実験で構成されたモデルにおいて、幅を固定させて高さを変化させた手法において、違和感なく提示できる確率 (=1 - 違和感が生起する確率) が縦方向の重心変化 (dG_y) について上に凸となった。形状変化について、幅方向の形状変化が敏感に感じられた結果、相対的に縦方向の形状に対して違和感の生起確率が減少したものと考える。それ以外の形状変化については、重心移動量や幅変化量が大きくなればなるほど、ベースラインの違和感生起確率が低くなり、そこから k の値に応じて違和感生起確率が変化する予測モデルとなった。本実験の定義域においては VR 物体の見た目の変化量が大きければ大きいほど、違和感なく形状変化を提示できるものと考える。

5.4 実験2: モデル評価実験

前章で構築したモデルの性能評価をするために、違和感が感じられにくいと同時に、Transcalibur の変形量を抑えながら動的形状変化を提示することができるかを検証した。本実験では、一般的に知覚認知心理実験で用いられている知覚弁別閾に基づいた手法のうち、「多くの人が知覚できる」とされる 75% 弁別閾(上弁別閾)を用いる。よって、違和感の生起確率が 25%(すなわち、違和感なく形状を知覚させられる確率が 75%)となるようなコントローラの変形量 k_{25} を用いて、どれだけ変形量が抑えられるか、その状態でどの程度違和感なくユーザに形状変化を提示させられるかを測定する。また、モデル精度を違和感生起確率に基づいて求める。

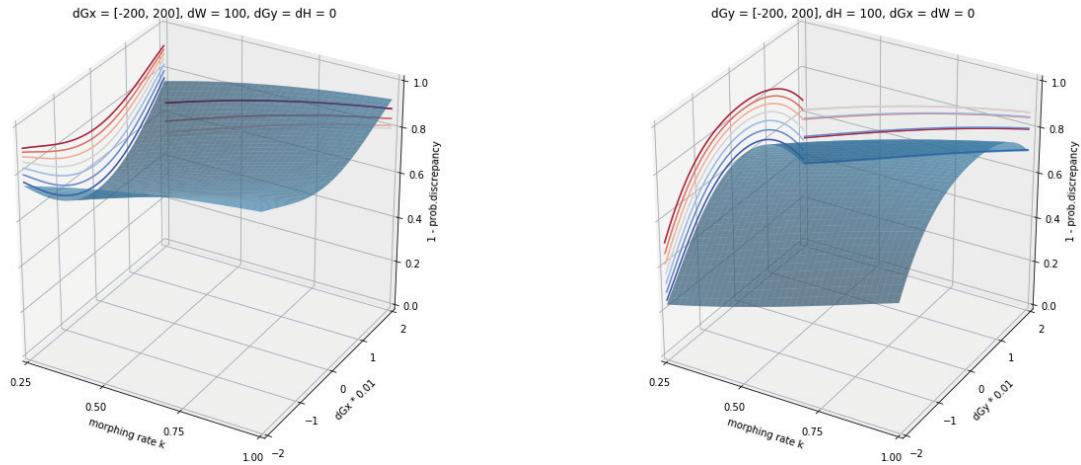


図 5.5: dGx を変化させ、他の変形量を固定させた際の k に対する違和感なく提示できる確率(左)と、 dGy を変化させ他の変形量を固定させた際の k に対する違和感なく提示できる確率(右).

5.4.1 実験のシステム構成

実験のシステム構成は、「データ収集実験(5.2節)」と同様である。また、実験参加者に説明する内容も同様とした。

実験参加者には、図 5.8 及び表 5.3 に示した 4 種類の形状の全形状変化 12 通りに対して、コントローラの変形量 $k = 0.25, 1.0$ に加えて、違和感生起率が 25% となるようなコントローラの変形量 k_{25} であるものを、各 2 回提示させた。よって、1 実験参加者に対して合計 $12 \times 3 \times 2 = 72$ 試行を行った。

5.4.2 現実空間の構成

現実空間の構成は、「データ収集実験」と同様である。

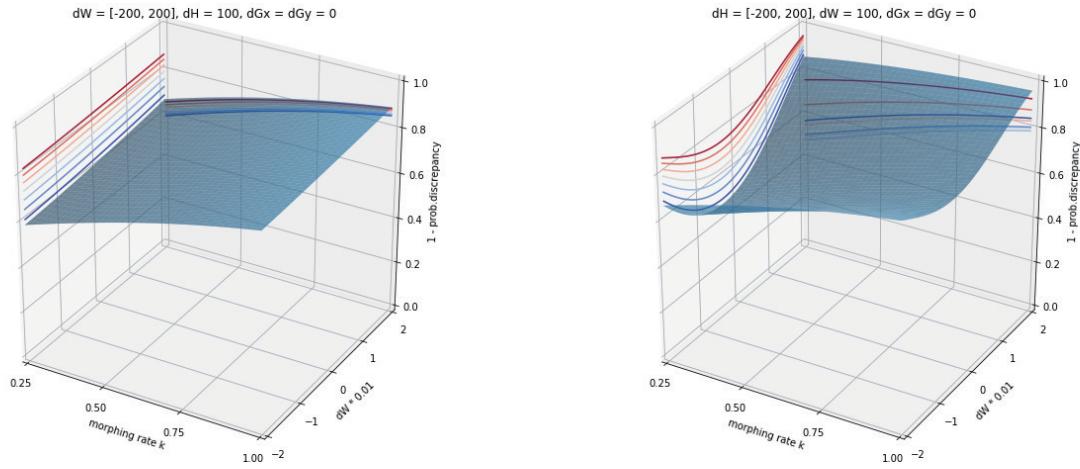


図 5.6: dW を変化させ、他の変形量を固定させた際の k に対する違和感なく提示できる確率(左)と、 dH を変化させ他の変形量を固定させた際の k に対する違和感なく提示できる確率(右).

Shape ID	H	W	Wr	Wl	p_r	p_l	θ_r	θ_l
1	200	200	100	100	0	0	50	50
2	300	150	125	25	125	0	73	90
3	200	250	125	75	0	104	90	0
4	150	300	225	75	125	0	0	60

表 5.3: 実験 2 で用いた VR 形状と Transcalibur パラメータの値一覧.

5.4.3 実験手順

実験参加者に実験に関する説明をしたのち、椅子に着席し、HMD を装着させた状態で実験を開始した。5.2.3 節に示したタスク 36 試行ごとに、5 分間の休憩を設けた。実験参加者はデータ収集実験に参加していない 12 人の男女(うち女性 4 人)で、平均年齢は 30.1 歳、うち一人は左利きであった。また実験終了後に謝礼として

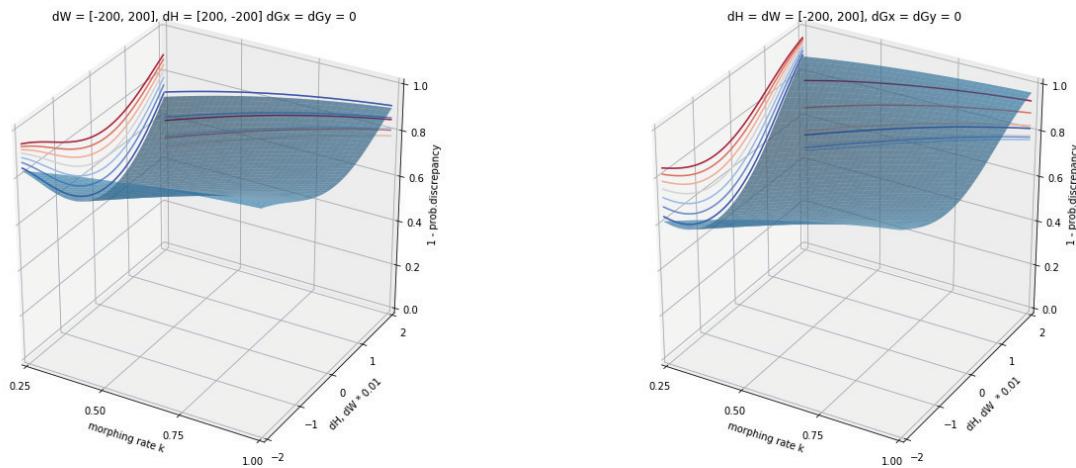


図 5.7: dW 変化させかつ dH を逆の方向に変化させ、他の変形量を固定させた際の k に対する違和感なく提示できる確率(左)と、 dW と dH を同じ方向に変化させ他の変形量を固定させた際の k に対する違和感なく提示できる確率(右).

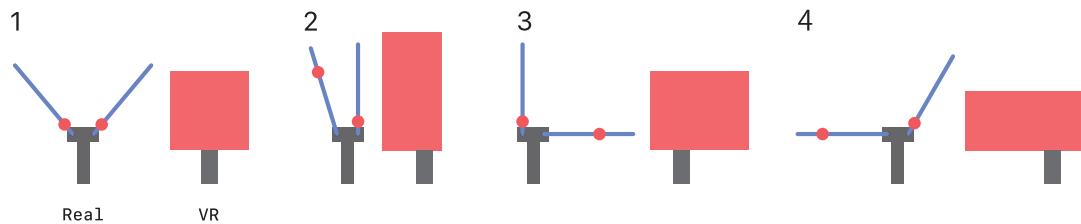


図 5.8: 実験 2 で用いた 4 種類の VR 形状と Transcalibur のパラメータ一覧.

アマゾンギフトカード 1000 円分を支払った。本実験によって合計 12 人から有効なデータを合計 840 点得た。

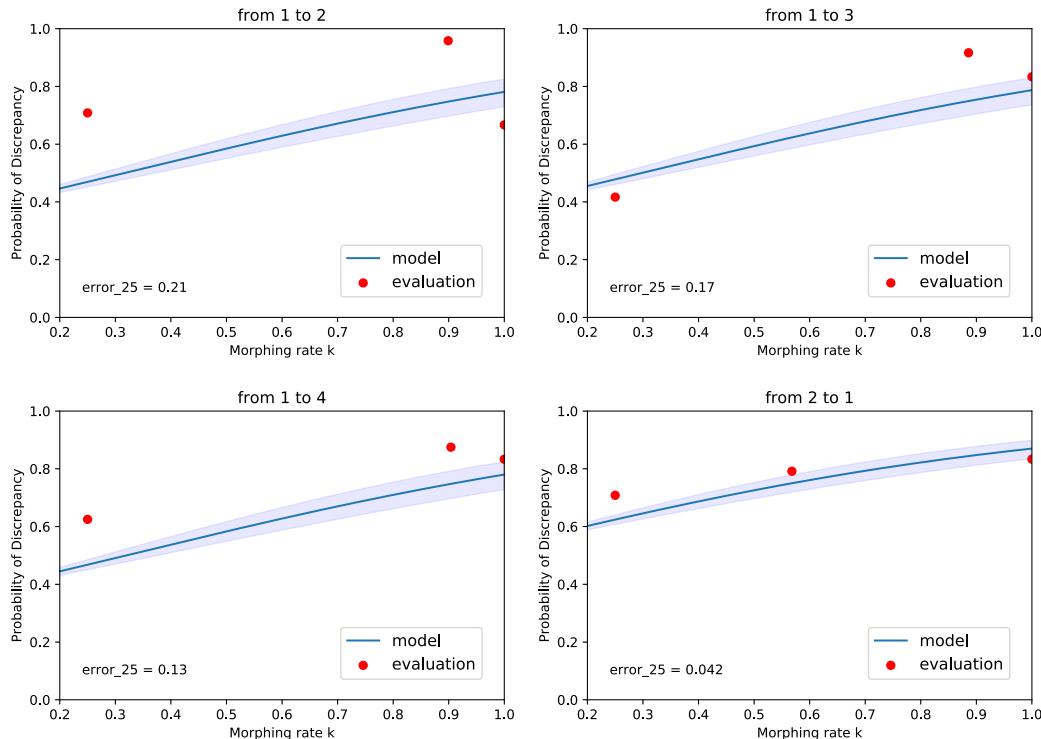


図 5.9: 実験 2 で得た違和感生起率と、実験 1 で得たモデルのプロット、及び k_{25} におけるモデルと実験データとの誤差 (1/3).

5.4.4 実験 2 の結果・考察

本実験で用いた各形状変形に対して、各 k 値における違和感生起率と、学習済み知覚モデルの予測違和感生起率をプロットしたものを、図 5.9 - 図 5.11 に示す。本実験において、12 点中 10 点において、 k_{25} における違和感生起率が予測違和感を上回った。全パターン中、 k_{25} における違和感生起確率の予測誤差の負値が、形状 4 から 2 への変化(図 5.11 左下)について最大(8.1%)となった。観測した全パターン 36 点での予測誤差の平均値は 8.6% であった、また、 k_{25} 点における予測誤差の平均値は平均して 8.0% であった。

形状 2 から 3 への変化、または形状 2 から 4 への変化は、 k_{25} 値がそれぞれ 47%, 37% と、大きく変形量を抑えてても、違和感を生起する確率を抑えられることが示され

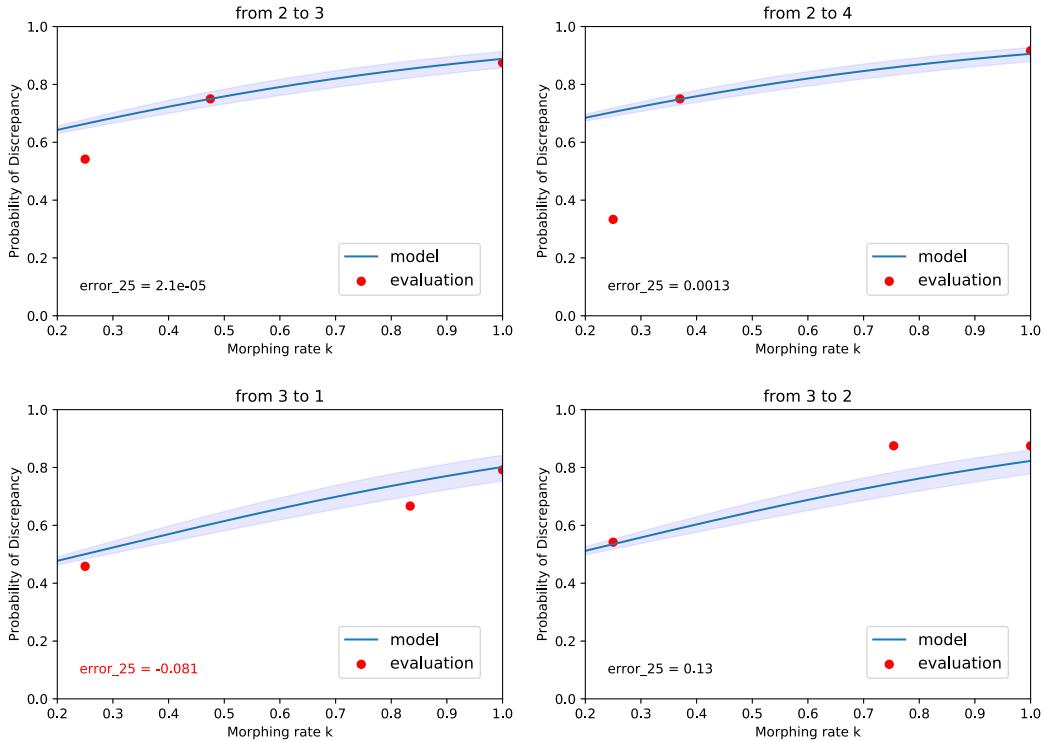


図 5.10: 実験 2 で得た違和感生起率と、実験 1 で得たモデルのプロット、及び k_{25} におけるモデルと実験データとの誤差 (2/3).

た。各変形の中でも最も横方向に視覚的に変化するため、知覚モデルが Transcalibur の変形量を抑えていることがわかる。一方で視覚変形量の小さい形状 1 から 2 への変化、および 1 から 3 への変化は、 k_{25} 値がそれぞれ 90%, 88% と、違和感なく形状変化を提示するためにコントローラの変形が多くなるように予測された。なお、これらの変形において、モデル評価実験ではモデルの予測よりも違和感が少なく知覚されており、この領域におけるパラメータ分布のばらつきが大きいため、モデル精度を向上させることで異なる結果が得られる可能性がある。

本実験で用いられる全パターンにおける k_{25} 値の平均は 72.1% であった。視覚刺激を併用することで Transcalibur の変形を、視覚刺激に応じて適切に調整することで、重りの位置や角度変化を小さくしつつも、多くのユーザに違和感なく動的変形を提示させられる変化量を得られることが示された。

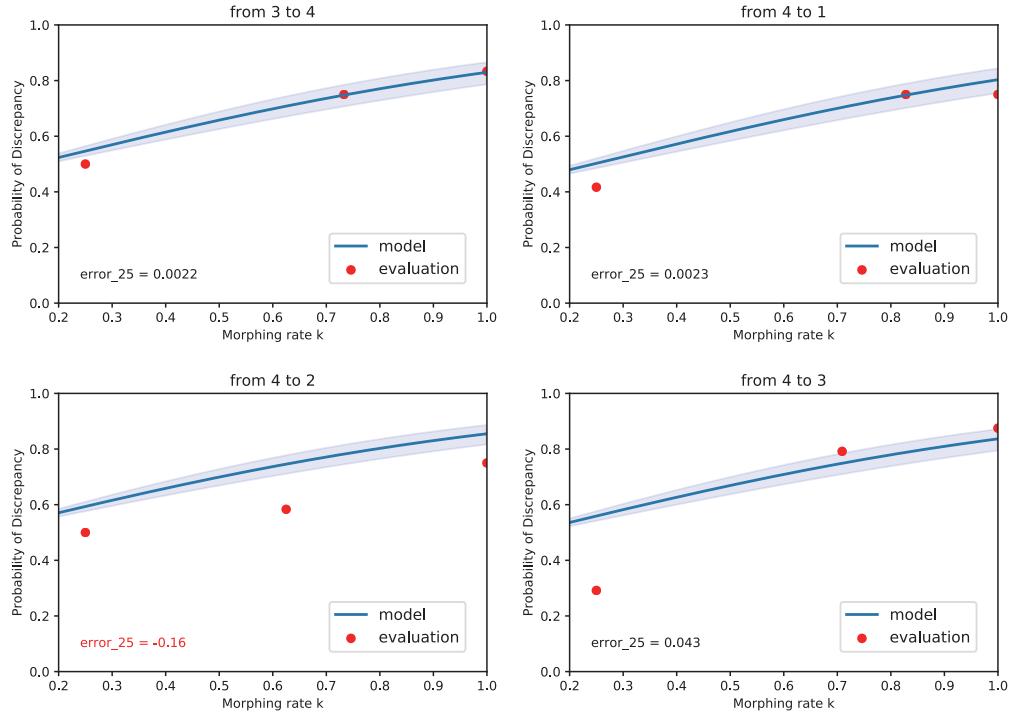


図 5.11: 実験 2 で得た違和感生起率と、実験 1 で得たモデルのプロット、及び k_{25} におけるモデルと実験データとの誤差 (3/3).

本実験の結果より、指定した違和感の予測生起率におけるコントローラ変化量において、多くの条件下で違和感なく形状変化を提示できることが示唆された。一方で、少数の変形パターンにおいて予測から大きく外れる結果も得た。モデルの学習においてカバーされなかった変形量に対して、正しく予測できなかった事が考えられる。

5.5 本章のまとめ

本章では、形状の見た目の時間的変化に合わせて、Transcalibur の形状を変化させた際に生じる動的な形状変化に対応させた知覚モデルを定義・構築し、その有効性について検証した。実験の結果、指定した違和感の予測生起率における少ないコントローラ変化量において、違和感なく動的な形状変化を提示できることが示唆さ

れた。本実験より、Transcalibur が VR 物体の動的な変化にあわせて変形する際に、より効率よく形状変化を知覚させられ、必要に応じて知覚をデザイン可能であることが示された。次章では、本章で述べた実験を含めた、本研究のまとめについて述べる。

第6章

結論

本章では本研究の結論を述べる。6.1節では本研究で得られた結果を、6.2では提案手法の問題点を、6.3では今後の課題について述べる。

6.1 本研究の成果

6.1.1 本研究の貢献

本研究の主な貢献をまとめると下記の通りである。

- 2次元平面上の重心を変化させることによって、VR空間内の形状変化を表現することのできる手持ち型VRコントローラ：Transcaliburを提案した。
- Transcaliburを用いて、様々な2次元VR物体形状を表現するための知覚モデルを定義・構築した上で、その有効性と精度を実験を通して示した。
- Transcaliburを用いて、様々な2次元VR物体形状の動的変化を違和感なく表現するための知覚モデルを定義・構築した上で、その有効性と精度を実験を通して示した。

6.2 本研究の課題

6.2.1 ハードウェアの制約

Transcaliburは小型のギアードモータを利用しておおり、印加できるトルクと形状変化の速度との間にトレードオフが存在する。すなわち、持っているVR物体が衝撃で壊れ、物体の重心や形状が即座に変わるといったシチュエーションには対応できない。先行研究のShifty[14]などで用いられる高速なベルト駆動機構や振動モータ[64]・EMS[28]等による触覚刺激を組み合わせることで、機構の観点から解決できる可能性がある。一方で、極めて早い形状知覚のスイッチングに対応するために、アプリケーションに応じて重心移動量そのものを制限し、図4.4と対応づけて視覚効果を利用することで、ハードウェアデザインを見直す事も考えられるが、詳しくは6.3.4節で述べる。

6.2.2 様々なマテリアルへの対応

本研究では、VR物体の比重をアクリル板として統制し実験を行ったため、比重の変数をモデルに組み込めていない。また、ムチや釣り竿のように弾性のある物体や、VR空間内での空気抵抗については考慮していない。物体の見た目や物理的な特性などから生じる視覚的印象をモデルに組み込めば、より多様な形状知覚が可能となると考える。

6.2.3 データ収集量とユーザ負荷のトレードオフ

本実験ではユーザからのデータ収集に少なくとも1時間弱を要した。モデル構築や修正・制度の向上のためのデータ収集をマニュアルに実行することは時間的リソースに負担がある。詳しくは6.3.3節で述べるが、ユーザの行動履歴からその知覚を観測し、データ収集のステップを自動化することでこの問題を解決できると考える。

6.3 今後の展望

6.3.1 3次元形状の形状提示

本研究では、様々な形状を2次元の四角形物体で抽象化し、データを簡単にして知覚モデルを定義し、提案手法の有効性について議論した。本手法では、少なくとも四角形物体にちょうど包含されるモデルについても有効であると言える。一方で、Transcaliburのアクチュエーションは2次元平面内に限定されており、重心はアクチュエーション平面内で3次元方向に移動しない。3次元方向に拡張した重心移動機構を用いることで、3次元物体の形状知覚を提示できると考えられる。また本研究で用いた知覚モデルは容易に拡張可能なため、本手法を応用することで知覚モデルにもとづく Haptic Shape Illusion を用いた形状提示が実現可能であると考える。

6.3.2 様々な物理特性の形状提示

本研究で知覚させる形状は、2次元平面内の剛体の形状、および形状の変化する剛体に限定している。他方VRアプリケーションで釣り竿やムチなどを振るうアプ

リケーションも考えられる。HEMP [52] などのように風のエフェクトを用いたVRアプリケーションなどでは、把持した物体が風にあたった際のエフェクトなどのインタラクションも考えられる。

このように弾性体や流体などの複雑な物理現象を提示するデバイスなどへの期待も高い。現時点で、Liu et al. による ShapeSense [65] や、Zenner et al. による [31] が、手持ちコントローラを動かした際の効力を用いて触力覚を提示する手法として提案されている。変位や速度を新たにパラメータとして記述できる、弾塑性や粘性などの物理現象を含めた知覚モデルへの期待もある。多くの物理現象に対応させた視触覚表現が実現すれば、新たなVRアプリケーションへの可能性が広がる。

6.3.3 データ収集と知覚推定のフレームワーク

本研究で提案した手法は、より多くのデータが得られることでモデルの精度が向上する。また、これまでの認知心理学の知見を直接利用することで、モデルのパラメータの定義域や事前分布を設定することができ、モデルの精度向上につながる。また、本手法で用いたモデルはオンライン学習が可能である。

2019年末までに、最新のスタンドアロン型VR HMDのOculus Go / Questは、販売台数が累計で2500万台を超える見通しがあり、全世界へVRアプリケーションが浸透していると言って過言ではない。あらゆるユーザから知覚情報が得られれば、あらゆるアプリケーションの触覚体験をより豊かに表現することができる。一方、本研究ではユーザに最適な形状を入力させる・質問に答えさせるという手法を用いている。すなわちユーザの知覚を“直接”観測しているという一つの大きな制約を抱えている。

一般論として、VR世界へのユーザの没入感を重視するVRアプリケーションに、何千万人というユーザから毎回「どのように感じられたか」というデータを集めるためのダイアログを用意するのは不適当である。よって、ユーザの知覚を直接測定するのではなく、ユーザの行動から知覚を推定する手法が求められる。

図6.1に、概念図を示す。将来的には、ユーザの知覚を行動データから推定する、ある種の推定器を構築する必要があるだろう。一例として、ユーザが手を遅く振っているときは、何か重たいものを持っているように感じているのではないかと推定

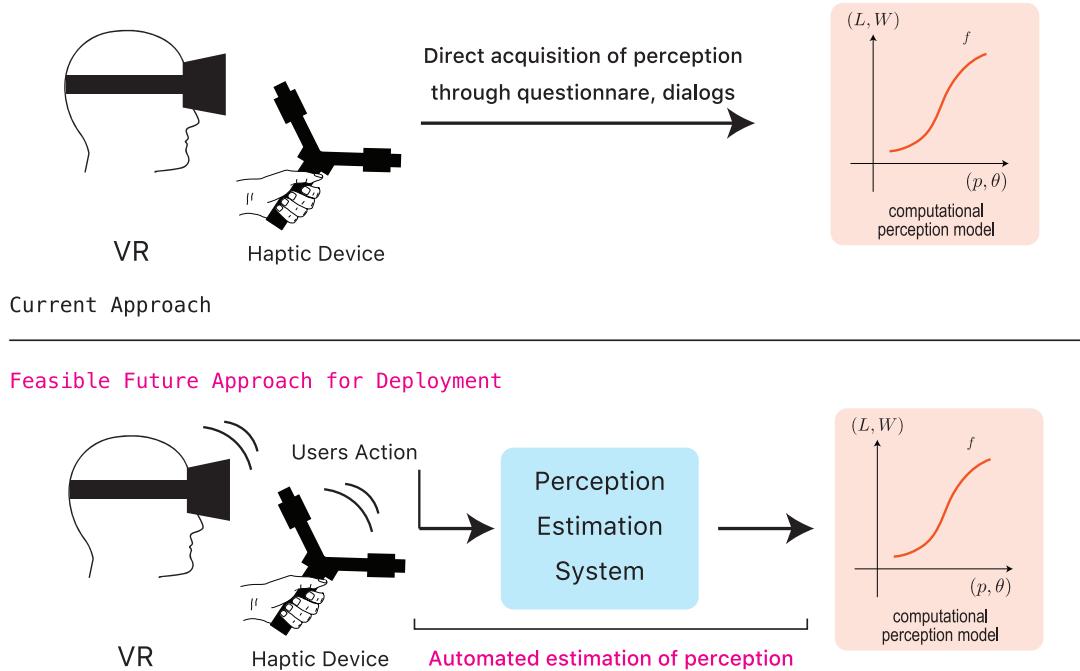


図 6.1: 提案システムと知覚推定システムとの比較.

できる、といったものが考えられる。今後、大量のユーザの行動履歴から知覚を推定し、利用できるようになれば、より多くのVR体験が豊かなものになるだろう。また、構築したモデルをもとにデータ可視化などを用いることで、人間の知覚・原理を理解することにもつながるだろう。

6.3.4 Computational Interaction · Virtual Reality と視触覚インターラクション

VR体験をデザイン・プロトタイプする上で、VRコンテンツが「体験者にどう感じてもらえたか」ではなく、「体験者にどう感じてもらうべきか」という主眼から設計することで、VRと人の関係性という概念をシステムの一部として工学的に扱う事ができる。とくに、視触覚相互作用などの複雑な知覚現象を簡単に扱えるようになれば、知覚認知心理学の専門知識なしに錯覚現象を利用したVRの表現力を高めることが可能となる。一般的に、機械設計などの工学的アプローチにおいては、要

求仕様を決定した上でプロダクトがつくられる。まるで機械設計のように、あらゆる人にどのような体験をさせたいかという要求仕様を決定した上で、簡潔にかつ効果的にVR体験をデザインできるようになれば、ハードウェアの制約などが原因でVR体験のオリジナリティを欠くことも無くなるだろう。

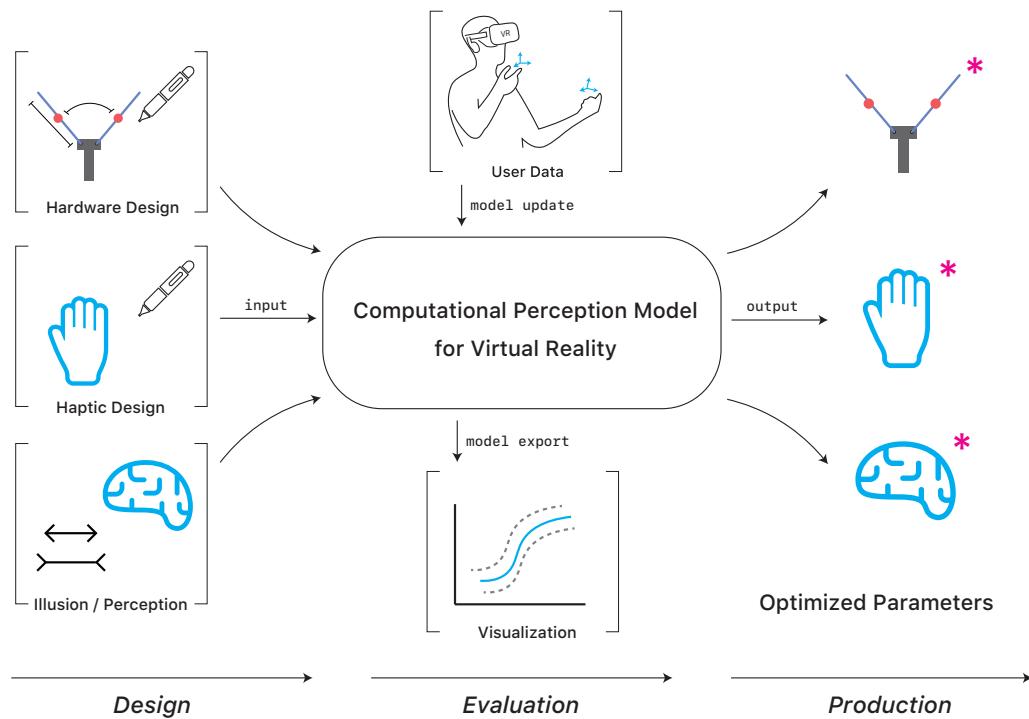


図 6.2: 知覚モデルを用いたVR触覚体験のデザイン。どのような触覚刺激を提供したいかという目的・ハードウェアの制約・これまでの知覚認知心理学の知見を用いて、知覚モデルを通じてそれぞれ最適なパラメータを簡単に見つけられるようになる。デザイン→評価→フィードバックという一連の流れをVR体験の制作に組み込むことで、VR体験をengineeringすることが可能となるだろう。

本研究の発展よって、VRコンテンツのデザイナーはあらゆるアプリケーションに、容易にリアルな触覚インタラクションを組み込むことができるようになるだけでなく、意図したインタラクションに適したハードウェアをも設計できるようになる。そして多くのユーザに高品位な触覚体験を提供できるVRシステムの実現に繋がり、インタラクションの性質も大きく変化すると考える。

世界中の人々がVRにより良く活動し、考えられるようになることで、単なるデジタルコンテンツとしてのVRは、人間の能力に計算機ドメインの能力を与え拡張させる、強力なシステムへと昇華するだろう。

第7章

本研究の成果

7.1 本研究の成果

本研究は、以下の国際学会・デモ・ポスター展示にて発表を行った。

7.1.1 学会論文

- Jotaro Shigeyama, Takeru Hashimoto, Shigeo Yoshida, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose: Transcalibur: A Weight Shifting Virtual Reality Controller for 2D Shape Rendering based on Computational Perception Model, In Proceedings of CHI2019, Glasgow, Scotland, UK. [Acceptance Rate: 23.8%] [CHI2019 Best Paper Honorable Mention 受賞][The first two authors equally contributed to the paper]

7.1.2 デモ展示

- Jotaro Shigeyama, Takeru Hashimoto, Shigeo Yoshida, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose: Demonstration of Transcalibur: A VR Controller that Presents Various Shapes of Handheld Objects, CHI2019 Demonstration, Glasgow, Scotland, UK.
- Jotaro Shigeyama, Takeru Hashimoto, Shigeo Yoshida, Taiju Aoki, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose: Transcalibur : Weight Moving VR Controller for Dynamic Rendering of 2D Shape using Haptic Shape Illusion, SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies, August 2018
- 東京大学バーチャルリアリティ教育研究センター設立記念式典-東京大学が挑戦するバーチャルリアリティの未来-

7.1.3 ポスター展示

- Jotaro Shigeyama, Takeru Hashimoto, Shigeo Yoshida, Taiju Aoki, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose: Transcalibur : Dynamic

2D Haptic Shape Illusion of Virtual Object by Weight Moving VR Controller, SIGGRAPH 2018 Poster, August 2018, [SIGGRAPH Student Research Competition Semi-Finalist 受賞 (褒賞金 500USD)]

7.1.4 主な紹介記事

- 東京大学、1台のハンドヘルドコントローラでVR内における様々な形状の触覚を再現できるVRデバイスを発表 (<https://shiropen.com/seamless/vr-transcalibur>)

謝辞

本学位論文は筆者が東京大学大学院学際情報学府に在学中、東京大学大学院情報理工学系研究科 廣瀬通孝教授の指導のもとで行なった研究をまとめたものです。

教授の廣瀬通孝先生、特任准教授の谷川智洋先生、准教授の鳴海拓志先生には、研究会などを通し、研究の本質について多くを教わり、自らの研究をブラッシュアップするまでの教唆を与えていただきました。特に准教授の鳴海先生には、学部時代から研究面でこれまでにありとあらゆる面でお世話になりました。また、ミュンヘンでの学会で一緒に、現地で様々な研究者の方を紹介していただきました。心より感謝いたします。

また、副指導教員の稻見昌彦教授からは多大なるサポートを頂きました。念願の留学を果たせたこと、トップレベルの研究に携わるきっかけを与えられたのは稻見先生のおかげと言って過言ではありません。ありがとうございました。今後とも宜しくお願ひいたします。

助教の吉田成朗先生からは、高専編入の先輩として、かつ研究室の先生として多くのアドバイスをいただきました。さらに Transcalibur のドライバ基板製作(図 3.5)をサポートしていただきました。一つのプロジェクトの発案から実験、論文の執筆・発表まで、憧れの先輩と共に研究を進めることができ、大変光栄でした。そして、今後ともどうぞよろしくお願ひいたします。ありがとうございました。

技官の中垣好之さん、秘書の英育子さんには、研究室生活をより豊かに、円滑にするための様々なサポートをしてくださいり、大変感謝しています。出張等の会計処理から給与・事務手続きまで多くのサポートをしていただき、ときには研究の激励をいただくこともありました。ありがとうございました。

博士課程の小川奈美さんとは、学部時代から研究相談に乗っていただいたり、また立体灯プロジェクトでは共著で論文を執筆したりするなど多方面でお世話になりました。いつか、また一緒に研究ができたらと思っております。松本啓吾さんとは普段から研究の垣根を超えて意見交換をしたり、留学先のハングルグでクラフトビールを飲んだり、北欧へ旅行するなど、公私ともにお世話になりました。次回ドイツに来られた際はビールの飲み過ぎには気をつけていただければと思います。また研究室 OB の伴祐樹さん、青木大樹さんには、帰国のたびにご飯や温泉に行くなど、いつも励ましていただいたことをお礼申し上げます。本当にありがとうございました。

研究室の同期や後輩の皆様も、短い間でしたが共に時を過ごしていただいたこと

を感謝いたします。特に修士課程の橋本健君は、Transcalibur のプロジェクトに多大なる協力をいただきました。橋本君の手助けがなければ、このプロジェクトをトップカンファに Publish し、Award を頂くことはなかったと言えます。心より御礼申し上げます。また修士課程の鈴木君と大橋君には、SIGGRAPH2018 での設営に多大な協力をいただきました。ありがとうございます。

実験参加者の皆様、デモ展示に関わってくださった皆様・お越しいただいた皆様、そして有益なフィードバックを頂いた方々に心よりお礼申し上げます。ありがとうございます。

最後に重ねて、研究室の先生方、学環・学府の先生方、先輩方、同期のみなさま、これまで励ましてくれた友人たちと家族に深く感謝して、謝辞と致します。本当にありがとうございました。

なお、本研究の一部は JST PRESTO(JPMJPR18JA) の支援を受けました。ご支援に感謝いたします。

2020年1月1日 茂山丈太郎

参考文献

- [1] Oculus Quest. <https://www.oculus.com/quest>.
- [2] Thomas H Massie, J Kenneth Salisbury, et al. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, Vol. 55, pp. 295–300. Citeseer, 1994.
- [3] Inrak Choi, Eyal Ofek, Hrvoje Benko, Mike Sinclair, and Christian Holz. CLAW: A Multifunctional Handheld Haptic Controller for Grasping, Touching, and Triggering in Virtual Reality. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '18*, pp. 1–13, 2018.
- [4] Young-Min Han, Chan-Jung Kim, and Seung-Bok Choi. A magnetorheological fluid-based multifunctional haptic device for vehicular instrument controls. *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 1, p. 015002, 2008.
- [5] D. Rocchesso, S. Delle Monache, and S. Papetti. Multisensory texture exploration at the tip of the pen. *International Journal of Human Computer Studies*, Vol. 85, pp. 47–56, 2016.
- [6] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Kei Nakatsuma, and Hiroyuki Shinoda. Touchable holography. In *ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies*, p. 23. ACM, 2009.
- [7] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Kei Nakatsuma, and Hiroyuki Shinoda. Touchable holography. *ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies on - SIGGRAPH '09*, pp. 1–1, 2009.
- [8] Pedro Lopes, Alexandra Ion, and Patrick Baudisch. Impacto: Simulating Physical Impact by Combining Tactile Stimulation with Electrical Muscle Stimulation. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, pp. 11–19, 2015.

- [9] Susan J Lederman and Roberta L Klatzky. Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive psychology*, Vol. 19, No. 3, pp. 342–368, 1987.
- [10] Ryuma Niiyama, Lining Yao, and Hiroshi Ishii. Weight and volume changing device with liquid metal transfer. In *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, pp. 49–52. ACM, 2014.
- [11] Pedro Lopes, Alexandra Ion, Sijing You, and Patrick Baudisch. Adding Force Feedback to Mixed Reality Experiences and Games using Electrical Muscle Stimulation. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '18*, No. c, pp. 1–13, 2018.
- [12] Michael T Turvey and Claudia Carello. Dynamic touch. In *Perception of space and motion*, pp. 401–490. Elsevier, 1995.
- [13] Augustin Charpentier. Analyse experimentale de quelques elements de la sensation de poids. *Archive de Physiologie normale et pathologiques*, Vol. 3, pp. 122–135, 1891.
- [14] Andre Zenner and Antonio Kruger. Shifty: A Weight-Shifting Dynamic Passive Haptic Proxy to Enhance Object Perception in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 4, pp. 1312–1321, 2017.
- [15] Randall L Susman and Jack T Stern. Functional morphology of homo habilis. *Science*, Vol. 217, No. 4563, pp. 931–934, 1982.
- [16] Wilder Penfield and Edwin Boldrey. Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain*, Vol. 60, No. 4, pp. 389–443, 1937.

- [17] Jirina Zelená. *Nerves and mechanoreceptors: the role of innervation in the development and maintenance of mammalian mechanoreceptors*. Springer Science & Business Media, 1994.
- [18] John Paul Nafe. The pressure, pain, and temperature senses. 1934.
- [19] Lester E Krueger. David katz ' s der aufbau der tastwelt (the world of touch): A synopsis. *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 7, No. 6, pp. 337–341, 1970.
- [20] Roberta L Klatzky, Susan J Lederman, and Victoria A Metzger. Identifying objects by touch: An “expert system”. *Perception & psychophysics*, Vol. 37, No. 4, pp. 299–302, 1985.
- [21] James J Gibson. Observations on active touch. *Psychological review*, Vol. 69, No. 6, p. 477, 1962.
- [22] I. Kant. *Immanuel Kant's Werke*. No. Volume 10 in Immanuel Kant's Werke. Modes und Baumann, 1839.
- [23] Geomagic Touch.
- [24] 安藤英由樹, 渡邊淳司, 稲見昌彦, 杉本麻樹, 前田太郎. Augmented reality のための爪装着型触覚ディスプレイの研究. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 87, No. 11, pp. 2025–2033, 2004.
- [25] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. In *ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies*, p. 8. ACM, 2007.
- [26] Vibol Yem, Ryuta Okazaki, and Hiroyuki Kajimoto. Fingar: Combination of electrical and mechanical stimulation for high-fidelity tactile presentation. In *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '16, pp. 7:1–7:2, New York, NY, USA, 2016. ACM.

- [27] Pedro Lopes, Sijing You, Lung-Pan Cheng, Sebastian Marwecki, and Patrick Baudisch. Providing haptics to walls & heavy objects in virtual reality by means of electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1471–1482. ACM, 2017.
- [28] Pedro Lopes, Sijing You, Alexandra Ion, and Patrick Baudisch. Adding force feedback to mixed reality experiences and games using electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 446. ACM, 2018.
- [29] Fabian Hemmert, Susann Hamann, Matthias Löwe, Josefine Zeipelt, and Gesche Joost. Weight-shifting mobiles: Automatic balancing in mobile phones. In *CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '10, pp. 3081–3086, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [30] Andre Zenner and Antonio Kruger. Shifty: A weight-shifting dynamic passive haptic proxy to enhance object perception in virtual reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 4, pp. 1285–1294, April 2017.
- [31] André Zenner and Antonio Krüger. Drag: On A virtual reality controller providing haptic feedback based on drag and weight shif. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 2019.
- [32] Shahabedin Sagheb, Robert LiKamWa, Alireza Bahremand, and Byron Laihey. Swish: Shifting weight-based interfaces for simulated hydrodynamics in mixed-reality fluid vessels. In *TEI 2019 - Proceedings of the 13th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, 2019.
- [33] Seungwoo Je, Myung Jin Kim, Woojin Lee, Byungjoo Lee, Xing Dong Yang, Pedro Lopes, and Andrea Bianchi. Aero-plane: A handheld force-feedback device that renders weight motion illusion on a virtual 2D plane. In *UIST 2019 - Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2019.

- [34] 任天堂 光線銃シリーズ. <https://www.nintendo.co.jp/>.
- [35] Guncon. <https://www.bandainamcoent.co.jp/cs/list/guncon/>.
- [36] タカラ バーチャルベースボール. <https://www.takaratomy.co.jp/>.
- [37] David McGookin and Stephen A. Brewster. *Haptic and Audio Interaction Design*. 2006.
- [38] Marilyn Rose McGee, Phil Gray, and Stephen Brewster. The effective combination of haptic and auditory textural information. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2001.
- [39] Marc Ernst. A Bayesian view on multimodal cue integration. *Perception*, 2006.
- [40] Jon Driver and Charles Spence. Multisensory perception: Beyond modularity and convergence, 2000.
- [41] Arlene S. Walker-Andrews. Infants' perception of expressive behaviors: Differentiation of multimodal information. *Psychological Bulletin*, 1997.
- [42] Anatole Lécuyer, Sabine Coquillart, Abderrahmane Kheddar, Paul Richard, and Philippe Coiffet. Pseudo-Haptic Feedback: Can Isometric Input Devices Simulate Force Feedback? *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference*, pp. 83–90, 2000.
- [43] Anatole Lécuyer, Jean-Marie Burkhardt, Sabine Coquillart, and Philippe Coiffet. "Boundary of illusion": an experiment of sensory integration with a pseudo-haptic system. *IEEE Virtual Reality 2001*, pp. 115–122, 2001.
- [44] Anatole Lécuyer, Jean-Marie Burkhardt, and Laurent Etienne. Feeling bumps and holes without a haptic interface: the perception of pseudo-haptic textures. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '04*, Vol. 6, pp. 239–246, 2004.

- [45] Anatole Lécuyer, Marco Congedo, Edouard Gentaz, Olivier Joly, and Sabine Coquillart. Influence of visual feedback on passive tactile perception of speed and spacing of rotating gratings. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol. 6192 LNCS, No. PART 2, pp. 73–78, 2010.
- [46] Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Magic pot: Interactive metamorphosis of the perceived shape. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, p. 14. ACM, 2012.
- [47] Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Modifying an identified size of objects handled with two fingers using pseudo-haptic effects. 2012.
- [48] Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Displaying shapes with various types of surfaces using visuo-haptic interaction. In *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 191–196. ACM, 2014.
- [49] Parastoo Abtahi and Sean Follmer. Visuo-haptic illusions for improving the perceived performance of shape displays. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’18, pp. 150:1–150:13, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [50] David Antonio Gomez Jauregui, Ferran Argelaguet, Anne-Helene Olivier, Maud Marchal, Franck Multon, and Anatole Lecuyer. Toward “pseudo-haptic avatars”: Modifying the visual animation of self-avatar can simulate the perception of weight lifting. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 654–661, 2014.
- [51] A Pusch and A Lécuyer. Pseudo-haptics: from the theoretical foundations to practical system design guidelines. In *Proceedings of the 13th international conference on multimodal interfaces*, pp. 57–64. ACM, 2011.

- [52] Andreas Pusch, Olivier Martin, and Sabine Coquillart. HEMP - Hand-displacement-based Pseudo-haptics: A study of a force field application. *3DUI - IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2008*, pp. 59–66, 2008.
- [53] 茂山丈太郎, 小川奈美, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝. アバタの関節角補正による疑似抵抗感提示. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No. 3, pp. 369–378, 2017.
- [54] Yuki Taima, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Controlling fatigue while lifting objects using pseudo-haptics in a mixed reality space. In *2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 175–180. IEEE, 2014.
- [55] Marc O Ernst and Martin S Banks. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, Vol. 415, No. 6870, pp. 429–433, 2002.
- [56] Yuki Koyama, Issei Sato, Daisuke Sakamoto, and Takeo Igarashi. Sequential line search for efficient visual design optimization by crowds. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 36, No. 4, pp. 48:1–48:11, July 2017.
- [57] Eisuke Fujinawa, Shigeo Yoshida, Yuki Koyama, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Computational design of hand-held VR controllers using haptic shape illusion. In *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '17*, pp. 1–10, 2017.
- [58] Michal Piovarčí, David I.W. Levin, Danny Kaufman, and Piotr Didyk. Perception-aware modeling and fabrication of digital drawing tools. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, Vol. 37, No. 4, 2018.
- [59] A. Oulasvirta. *Computational Interaction*. Oxford University Press, 2018.
- [60] Teensy. <https://www.pjrc.com/teensy/>.

- [61] Idsart Kingma, Rolf Van De Langenberg, and Peter J. Beek. Which Mechanical Invariants Are Associated With the Perception of Length and Heaviness of a Nonvisible Handheld Rod? Testing the Inertia Tensor Hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 30, No. 2, pp. 346–354, 2004.
- [62] Yusuke Ujitoko, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Koichi Hirata, and Michitaka Hirose. Yubi-toko: finger walking in snowy scene using pseudo-haptic technique on touchpad. In *SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies*, p. 29. ACM, 2015.
- [63] John Salvatier, Thomas V. Wiecki, and Christopher Fonnesbeck. Probabilistic programming in python using PyMC3. *PeerJ Computer Science*, Vol. 2, p. e55, apr 2016.
- [64] Jun Rekimoto. Traxion: A Tactile Interaction Device with Virtual Force Sensation. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '13)*, pp. 427–431, 2013.
- [65] Yuhu Liu, Takeru Hashimoto, Shigeo Yoshida, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. ShapeSense: A 2D shape rendering VR device with moving surfaces that controls mass properties and air resistance. In *ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies, SIGGRAPH 2019*, 2019.
- [66] Google Forms.

付録A

実装に使用した周辺機器・アンケート

本研究での実装に用いたライブラリを紹介する。

A.1 Unity

Unity は Unity Technologies 社の提供するゲーム制作用のミドルウェアであり、本研究での VR 空間提示・実験環境制作にあたって用いた。Unity は Oculus や VIVE など多くの HMD に対応しており、コードを書かずともバーチャル空間を視覚提示できるフレームワークが備わっているため、VR 実験やゲーム制作に広く用いられている。

A.2 VIVE Pro

VIVE Pro は本研究で用いた HMD(Head Mounted Display)である。VIVE Pro は HMD 本体とポジショントラッカーから構成される。映像は 90[fps] で安定的に動作する。HMD 本体には赤外線 LED センサーが配置されており、付属の BaseStation がトラッキングスペース全体に面上のレーザー光をスキャンすることでセンサーが反応し、HMD の位置・姿勢をトラッキングすることができる。

A.3 pymc

pymc は、MCMC(Markov-Chain Monte Carlo 法)を用いた、ベイジアン統計モデリングと確率的機械学習のための Python package である。図 A.2 に、動的形状変化の提示システムで用いたモデルを推定するために行ったパラメータのサンプリングの過程を示す(以下のサンプリングの過程で偏った分布が生じていればサンプリングが正しく行われなかったことが検知できる)。

A.4 Google Forms

アンケートには、Google Forms [66] を利用し、被験者は Apple 社の iPad を用いて回答した。



<https://www.vive.com/jp/>

図 A.1: Vive Pro HMD, Steam VR Base Station V2, Vive Tracker

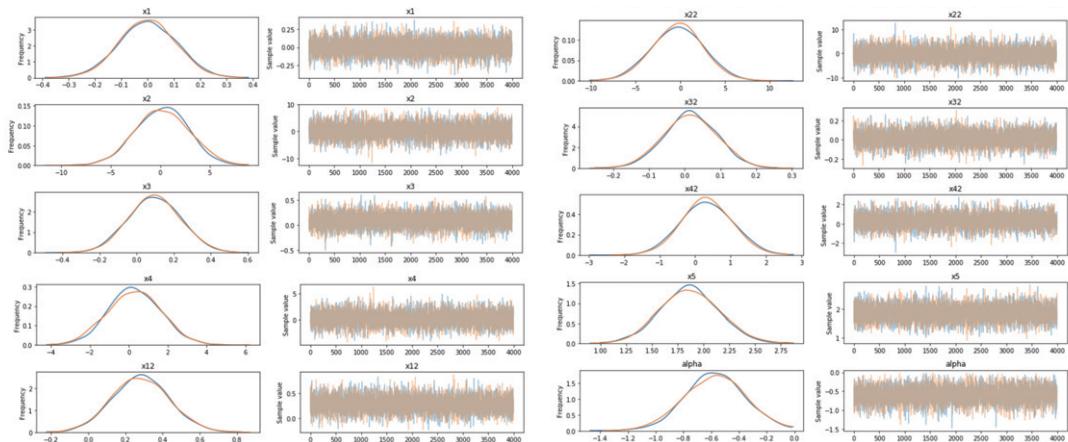


図 A.2: 動的形状提示実験における, pymc によるモデルのパラメータ事後分布と, リサンプリングトレースのグラフ. 2 度のラウンドでほぼ同様な分布に収束していることが示されている. なお, リサンプリング過程に偏りがある場合にはパラメータ分布が正しく収束しなかったと判断できるが, 本実験条件においてはそのような問題は生じていなかった.

以上

1p ∼ 102p 完

修士論文

令和元年度

東京大学大学院学際情報学府 先端表現情報学
コース
49-176312 茂山丈太郎