

**誇張表現に基づいた  
触覚インタラクションの設計・開発**

蜂須 拓

電気通信大学大学院情報理工学研究科

博士（工学）学位申請論文

2015 年 3 月

# 誇張表現に基づいた 触覚インタラクションの設計・開発

## 博士論文審査委員会

主査	梶本	裕之	准教授
委員	兼子	正勝	教授
委員	板倉	直明	教授
委員	坂本	真樹	准教授
委員	野嶋	琢也	准教授

著作権所有者

蜂須 拓

2015 年

# Exaggeration-Based Haptic Interaction

Taku Hachisu

## Abstract

Designing and developing haptic interaction are promising research area to enrich experience in virtual reality. While natural approach to enrich the interaction is to reproduce physically accurate phenomenon (i.e. photorealistic approach), this approach is not always efficient for following reasons. First, a rigid adherence to physically accurate creation limits the range of expression. Second, the reliability of haptic sensation is relatively low so that haptic sensation is often dominated by audio and vision. From these reasons, photorealistic haptic interaction is not the best for creating artificial feeling.

To cope with this problem, the author employs exaggeration expression used in audio visual contents such as manga and animation, by which the creator makes the objects in the world seem faster, larger, heavier, etc. than they really are. The depicted world is not photorealistic, but readers or audiences feel plausibility and understand what the creator intends. In addition, the exaggeration expression expands the range of expression. The purpose of this thesis is to design and develop exaggeration-based haptic interaction and to find and systemize ways to apply the exaggeration expression to haptic interaction.

The thesis first defines three logical models for exaggeration expression: 1) substitution model; 2) modulation model; and 3) superimposition model to establish guide principle for designing and developing haptic interactions. In the first model, sensation A is substituted by another sensation B. In the second model, sensation A is modulated by modification k. In the third model, sensation A is superimposed by another sensation B. Then eight haptic interactions that the author designed and developed are described, which involve the whole body motion, hand-held tools and bare-hand interactions. The purposes of each work are described and the implementations and evaluations of the haptic interactions are conducted based on the purposes. Finally, the thesis concludes with discussion about the eight haptic interactions and three models, which envisions future direction of exaggeration-based haptic interactions.

# 誇張表現に基づいた 触覚インタラクションの設計・開発

蜂須 拓

## 概要

物体に触れた際の体験を再現する触覚インタラクションの設計・開発はバーチャルリアリティの体験の質を向上する手段として注目されている。一方で、視聴覚と比較して触覚研究の歴史は浅く、質の高い触覚インタラクションの設計・開発は発展途上であるといえる。触覚インタラクションの設計・開発のアプローチに現象を忠実に再現する写実的なアプローチがある。しかし、写実的な触覚インタラクションは現象の再現性は高いものの、現実には起こりうる体験しか表現できない。また、視聴覚と比較して触覚から得られる情報は不明瞭であり、感覚統合において劣位に扱われてしまう。以上から、現象の再現性が必ずしも必要なく、幅広い表現や体験の明瞭さが重要であるエンタテインメント等での触覚インタラクションの応用を考えた際、写実的なアプローチとは別のアプローチが必要であるといえる。これに対し、著者は漫画やアニメーションで用いられる誇張表現の概念を触覚インタラクションの設計・開発に適用することを考えた。

漫画やアニメーションでは現実を基に大げさに描くという誇張表現を用いて、視聴者に非現実的ではあるがもっともらしいという印象(本論文では実感性と定義)を与える。本論文は誇張表現の概念を触覚インタラクションの設計・開発に適用することで、再現性は高くないが実感性に優れた触覚インタラクションを設計・開発することを目的とする。これにより、触覚インタラクションの表現の幅の拡張、および分かりやすく実感性のあるも体験の実現を期待する。また、設計・開発した触覚インタラクションを総括することで誇張表現に基づいた触覚インタラクションの実感性を向上させるための要件を明らかにする。

本論文では、まず誇張表現の論理構造を見だし、3つの論理モデルを設定する。次に、3つのモデルを基に8つの触覚インタラクションの設計・開発に関する研究について述べる。各研究では、個別の研究背景および目的について述べ、触覚インタラクションを実装し、目的に則した評価によって個々の有効性を検証する。そして、設計・開発した触覚インタラクションおよびモデルを総括し、実感性を向上させるための要件を明らかにする。本論文は全6章から構成され、内容の要旨は以下のとおりである。

第1章では、まず触覚インタラクションが注目されるようになった背景について述べ、写実的アプローチの限界について指摘する。次に、漫画やアニメーションに見られる誇張表現について述べ、本論文の目的として「誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発」および「誇張表現に基づいた触覚インタラクションの実感性を向上させるための要件を明らかにすること」を設定する。そして、誇張表現の論理的な分類を

行い、触覚インタラクションの設計・開発の指針とするための3つのモデル（代替モデル、変調モデル、重畳モデル）を見いだす。代替モデルでは、感覚  $A$  を別の感覚  $B$  に置換して提示する。変調モデルでは、感覚  $A$  に操作  $k$  を加えて変調し提示する。重畳モデルでは、感覚  $A$  に別の感覚  $B$  を提示して重畳する。

第2章では、本論文で扱う触覚について定義する。触覚に関する基礎的な生理学的、心理学的知見に関して述べ、次章以降で述べる触覚インタラクションの設計・開発において必要な知見を共有する。

第3章では、代替モデルに基づいた2つの触覚インタラクションの設計・開発について述べる。1つ目は肘部の屈伸運動に伴ってロータリスイッチを回した時に生じる周期的な触覚フィードバック（カチカチ感）を提示するカチカチ感提示装置の設計・開発である。本装置によって視覚的運動知覚が困難な状況において触覚的運動知覚を拡張することでユーザの身体姿勢の制御の向上を試みる。2つ目は視覚から材質感を提示する手法 Visual Vibration の設計・開発である。本手法では、現実では聴覚・触覚で感じられる高周波数振動を視覚で感じられるように変調して疑似触覚提示を行う。本手法のケーススタディとして物体を叩いた時に生じる振動を取り上げ、視覚的な振動提示による材質感提示を試みる。

第4章では、変調モデルに基づいた3つの触覚インタラクションの設計・開発について述べる。1つ目は叩き動作に対して振動提示することでタッチスクリーンが異なる材質になったかのような体験を提供する HaCHIStick & HACHISStack の設計・開発である。本システムは時間応答性に優れており、叩いた瞬間に振動提示が可能である。そのため、ユーザにとっては叩いた対象の材質が変わったように感じられる。2つ目は歯磨き音を変調して提示することで歯磨きの快感および達成感を増強する拡張歯ブラシの設計・開発である。羊皮紙錯覚（手を擦った際に生じる音の高周波成分を強調すると手のひらが乾いた紙のように感じられる）を利用して汚れている、美化されているといった歯の状態を疑似的に再現し、歯磨きの体験を拡張する。3つ目は徳利を傾けた際に内容液の流出によるトクトクという振動（トクトク感）提示の設計・開発である。実際に徳利から液体が流出する際に生じる振動を計測、モデリングし、実際に液体を注ぐことなくトクトク感を再現する。実験的に構築した振動モデルをもとに、粘性感および残量感を再現する。

第5章では、重畳モデルに基づいた3つの触覚インタラクションの設計・開発について述べる。1つ目は前章で述べたトクトク感を実際のペットボトルで液体を注ぐ動作に重畳するトクトク感重畳の設計・開発である。トクトク感重畳による注がれる液体の量の錯誤効果を示し、飲食体験の触覚的演出の可能性を示す。2つ目は関節部の屈伸運動に伴って振動を提示することで関節が異なる材質になったかのような体験を提供する Jointonation の設計・開発である。本システムによって、サイエンスフィクションに登場するゴム人間やロボットに視聴覚に加え触覚的にも変身したかのような体験を提供する。3つ目はタッチスクリーン上でのユーザの動作に対して引力提示を行う装置 VacuumTouch の設計・開発である。本装置は引力提示によってタッチスクリーン上に摩擦感を重畳する。これにより例えばタッチスクリーン上に擬似的な引っかかりをつくりだし、ユーザの操作の補助を行う。

第6章では、3つの誇張表現の論理モデルおよび8つの触覚インタラクションに関する研究を総括する。各々の研究を再評価し、課題を整理することで誇張表現に基づいた触覚インタラクションの実感性向上のための要件を明らかにする。そして、本論文の成果を基に誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発に関する研究の今後の展望について論じる。

# 目次

第1章 序論 .....	1
1.1 バーチャルリアリティ .....	1
1.1.1 触覚インタラクション .....	2
1.1.2 漫画・アニメーションにみる誇張表現 .....	3
1.2 本論文の目的および構成 .....	4
1.2.1 誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発 .....	4
1.2.2 誇張表現の論理モデル .....	4
1.2.3 本論文の構成 .....	6
第2章 触覚の生理・心理学的知見および分類 .....	8
2.1 触覚 .....	8
2.2 皮膚感覚 .....	9
第3章 代替モデルに基づいた触覚インタラクション .....	13
3.1 カチカチ感: 屈伸運動に応じた周期的な触覚提示による運動知覚の拡張 ...	13
3.1.1 研究背景 .....	13
3.1.2 先行研究 .....	14
3.1.3 カチカチ感提示装置 .....	15
3.1.4 実験1: 腕立て伏せにおけるカチカチ感提示の効果検証 .....	17
3.1.5 実験2: 姿勢再現におけるカチカチ感提示の効果検証 .....	21
3.1.6 展示 .....	23
3.1.7 まとめ .....	24
3.2 Visual Vibration: 叩き動作に応じた視覚的材質感提示 .....	26
3.2.1 研究背景 .....	26
3.2.2 先行研究 .....	27
3.2.3 Visual Vibration .....	30
3.2.4 実験1: Visual Vibration による材質感提示検証 .....	31



3.2.5	実験 2 : Visual Vibration による材質感識別再検証.....	36
3.2.6	考察.....	38
3.2.7	アプリケーション.....	39
3.2.8	キングコング効果.....	39
3.2.9	まとめ.....	39
3.3	第 3 章まとめ.....	42
<b>第 4 章</b>	<b>変調モデルに基づいた触覚インタラクション.....</b>	<b>43</b>
4.1	HaCHIStick & HACHISStack: 叩き動作に応じたタッチスクリーン材質感変調 43	
4.1.1	研究背景.....	43
4.1.2	HaCHIStick : 材質感提示のための振動提示スティック.....	44
4.1.3	HACHISStack : 材質感変調のためのタッチパネル.....	49
4.1.4	アプリケーション.....	60
4.1.5	振動提示の遅延が材質感変調に及ぼす影響.....	64
4.1.6	まとめ.....	68
4.2	拡張歯ブラシ: 歯磨き動作に応じた歯磨き音変調による歯磨き感の拡張... 70	
4.2.1	研究背景.....	70
4.2.2	先行研究.....	70
4.2.3	拡張歯ブラシ.....	72
4.2.4	実験 1 : 歯磨き音の周波数変調の効果検証.....	74
4.2.5	実験 2 : 歯磨き音の時間的変動の効果検証.....	79
4.2.6	まとめ.....	82
4.3	トクトク感再現: 傾ける動作に応じた振動提示によるトクトク感再現..... 84	
4.3.1	研究背景.....	84
4.3.2	先行研究.....	84
4.3.3	トクトク感再現.....	85
4.3.4	粘性感の再現.....	91
4.3.5	残量感の再現.....	94

4.3.6	まとめ	97
4.4	第4章まとめ	99
<b>第5章</b>	<b>重畳モデルに基づいた触覚インタラクション</b>	<b>101</b>
5.1	トクトク感重畳：液体を容器から注ぐ動作に応じた振動重畳	101
5.1.1	研究背景	101
5.1.2	先行研究	101
5.1.3	アタッチメント型トクトク感重畳装置	102
5.1.4	トクトク感重畳が水を注ぐ量に及ぼす影響検証実験	102
5.1.5	まとめ	104
5.2	Jointonation: 屈伸運動に応じた振動提示による関節材質感変調	106
5.2.1	研究背景	106
5.2.2	先行研究	106
5.2.3	周期的な減衰正弦波提示による関節材質感変調	107
5.2.4	ロボット駆動時の振動提示による関節材質感変調	111
5.2.5	没入型ロボット変身体験 VR ゲーム	118
5.2.6	まとめ	122
5.3	VacuumTouch: タッチスクリーン上での動作に対する引力提示	124
5.3.1	研究背景	124
5.3.2	先行研究	124
5.3.3	VacuumTouch	126
5.3.4	システム構成	128
5.3.5	アプリケーション	129
5.3.6	引力提示によるダイヤル GUI の操作性評価実験	130
5.3.7	考察	139
5.3.8	おわりに	140
5.4	第5章まとめ	141
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>142</b>

6.1	誇張表現に基づいた触覚インタラクションの評価.....	142
6.1.1	評価尺度.....	142
6.1.2	評価.....	143
6.2	今後の展望.....	146
6.2.1	他の感覚との相互作用の検証.....	146
6.2.2	写実的な触覚インタラクションの設計・開発との関係性.....	146
6.2.3	誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発の蓄積.....	147
	謝辞.....	148
	関連発表.....	149
	参考文献.....	151



# 第1章

## 序論

### 1.1 バーチャルリアリティ

近年、バーチャルリアリティ (Virtual Reality: VR) という工学的に現実を再現する研究が盛んに行われ、新たな学問領域としての地位を確立している[162]。VR はしばしば仮想現実と訳され、本物ではないという印象が強くもたれるが、これは一種の誤訳であり、英語の *virtual* には「名目上は異なるが本質的にそうである」という意味をもつ。その意味では VR は現象から抽出された本質によって再構築された現実と訳すことができる。現実の再構築にはしばしばコンピュータが用いられ、コンピュータ内の VR 世界と現実世界のユーザの対話はヒトとコンピュータの対話 (Human-Computer Interaction: HCI) において革新的な情報提示手段として注目を浴びている。VR は主にユーザが現実世界では困難、不可能である体験をユーザに体験可能とする。VR の応用先の例としては、医療・軍事訓練やビデオゲーム等のエンタテインメントが挙げられる。

VR 世界と現実世界のユーザは VR インタフェースを介して対話を図る。我々は感覚器を介して外界からの光や振動等の刺激を受容し、外界を現実として認識する。VR では VR インタフェースを介して感覚器に現実と本質的に同様な刺激をユーザに提示することで現実の再構築を行う。例えば、我々は目を介して外界からの光を受容し、見えるものを現実として認識する。目の網膜には RGB (赤緑青) の電磁波 (可視光) を感知する錐体細胞が存在し、それぞれの錐体細胞の発火パターンを脳が処理することで映像が見える。一方で、人工の光を提示した場合でも、錐体細胞の発火パターンが同一であれば同様の映像が見える。この原理を利用したものがカラーモニターであり、視覚の VR インタフェースである。加えてユーザの運動を VR インタフェースへの入力とすることで VR 世界との対話が可能となる。例えば、ユーザの頭部に加速度センサや磁気センサを取り付けることでユーザの頭部運動を計測できる。この頭部運動計測と頭部搭載型のカラーモニター (ヘッドマウントディスプレイ (Head-Mounted Display: HMD)) を組み合わせると、ユーザの頭部向きに合わせた映像が提示でき、ユーザは現実世界を見渡すように VR 世界を見渡すことができる。

VR の体験の質を評価する上で、現象をいか忠実に再現できたかという再現性とユーザが VR 世界に入り込んでいるかという臨場感といった尺度がしばしば用いられる。単一の感覚提示の再現性を向上させることで臨場感も向上する。一方で、臨場感の向上に関して、マルチモーダルと呼ばれる複数の感覚提示を行うアプローチがある。現実世界において、我々は常にいわゆる五感全てを駆使して現実の認識を行っている。そのため、提示する感覚の数を増やすことは現実世界に近い状況をつくりだしていることに等しく、ユーザは VR 世界に入り込んだように感じられる。例えば、音声通話 (聴覚) にモニター (視覚) が組み合わさること (テレビ電話) で、遠隔にいる相手がよりその場にいるかのように感じられ、臨場感が向上することは想像に難くない。

### 1.1.1 触覚インタラクション

視覚，聴覚に続く感覚提示チャンネルとして触覚が注目されている。触覚の知覚メカニズムに関しては次章で述べるが，他の感覚と比較して触覚はその対話性（インタラクション）において特異である。日常的な対象物の触覚的認知は触れる，つまむ，なでる等のユーザの能動的な働きかけと，それに対する対象物からの反応を筋肉や関節，あるいは皮膚の感覚の応答より統合的に行われる。つまり，触覚的認知は働きかけと応答といったインタラクションを伴う。触覚インタラクションの設計・開発は視聴覚コンテンツのような受動的な鑑賞に留まらないユーザの働きかけを伴うコンテンツの創造を意味する。一方で，視聴覚研究に比べて触覚研究は歴史が浅いため，触覚インタラクションの設計・開発は発展途上であるといえ，質が高いとはいえない。

触覚インタラクションの質の向上を考えた際，現象を忠実に再現する写実的なアプローチが考えられる。今日のコンピュータグラフィックスやサウンドレンダリング技術による写実的な視聴覚コンテンツは現実と見分けがつかないほどの再現度である。これらはユーザに高い臨場感を提供していることから，触覚インタラクションの設計・開発においても現象の再現度に焦点をあてた写実的なアプローチが重要であるといえる。例えば，医療手術等の指先の触覚が重要になるような場面において，触覚インタラクションが写実的に再現されたバーチャルな手術環境での訓練は有意義であるといえる。

しかし，写実的なアプローチに基づいた触覚インタラクションの設計・開発は表現の幅に限界があるといえる。写実的なアプローチは実際に生じる現象を忠実に再現するものであるため，現実には起こりうる触覚インタラクションしか表現できない。

さらに，現実に感覚統合において触覚はしばしば劣位に扱われることから，写実的に再現された触覚インタラクションによる臨場感向上の貢献は小さいと考えられる。ここでは例として視覚と比較する。視力 1.0 での 50cm 先（腕を伸ばして指先で触れられる距離）を見たとき約 0.15mm のランドルト環（視力検査で用いられる C 型の指標）の切れ目が分かるのに対し，指先の二点弁別閾<sup>1</sup>は約 1.5mm であり，視覚の方が 10 倍ほど優れている。つまり，触覚から得られる情報は不明瞭であり，このため感覚統合において視覚がしばしば触覚よりも優位に寄与し（3.2.2 項参照），ユーザ（の脳）は触覚手がかりを重要に扱わない。

以上から，現象の再現度が必ずしも必要ないエンタテインメント等への応用において，体験をより豊かにするという目的を達成するためには写実的なアプローチは限界があるといえる。つまり，写実的なアプローチとは別のアプローチで触覚インタラクションの設計・開発を行い表現の幅を広くし，体験を明瞭で分かりやすくする必要がある。

これに対し，著者は漫画やアニメーションで用いられる誇張表現の概念を触覚インタラクションの設計・開発に適用することを考えた。

---

<sup>1</sup>二点に機械的刺激をあたえた時，これらが別々の刺激によるものである（二点である）と識別できる最小の距離。

## 1.1.2 漫画・アニメーションにみる誇張表現

以前は「漫画を読むと馬鹿になる」といわれ、大人が子供から漫画を取り上げる時代もあった。本論文ではこの文言が果たして正しいか否かの議論は避けるが、おそらく漫画は小説と比較して絵が多いことが主張の根拠として考えられる。絵は視覚から受け取れる情報量がテキストよりも多いため、読者が想像によって補う割合が低くなると考えられる。例えば、表情や風景、機械の機構をテキストで詳細にかつ正確に伝えるには膨大な文字数が必要となり読み手の時間的なコストも膨大となるため、通常は大まかに表現されて詳細は読み手の想像に任せられる。一方で、漫画は絵によって示されるため、文章で示されるよりも読者が同様のものを想像しやすい。また、漫画は写實的に描かれた絵画とも異なり、現象が描いた人の意図によって歪められる。そのため、写實的な絵画は構図等から描いた人の意図をくみ取る必要があるが、漫画は描いた人の強調したい部分がはっきりと分かる。

「現実が描いた人の意図によって歪められる」点について、手塚治虫は「省略」「誇張」「変形」が漫画の要素であると述べている[168]。手塚は著書の中で幼児が描いた人の絵を例に：省略) 手の指の数を減らす；誇張) 頭を福助みたいに大きく描く；変形) 描きやすいように好き勝手に形を変える、と三要素を説明している。幼児は印象に残った部分や能力的な制約から無意識に上述のゆがみを生じさせていると考えられるが、漫画家はこれを意図的に行っている。本論文では、このように実際の形状や性質を意図的に変化させることを誇張表現と定義する。

誇張表現は本質の強調であるといえる。ディズニーアニメーションにリアリズム (realism) と呼ばれるコンセプトがある。これは「plausible impossibility」とも呼ばれ[10]、直訳すると「ありうると思わせる、もっともらしい不可能性」となる。ディズニーの求めたリアリズムは通常のリアリズム (写実主義) とは異なる。ディズニーはアニメーターに対し「もっとリアリズムを重視しろ」と命じておいて、できあがった絵を見ると「誇張が足りない」と文句を言うことがあった[170]。一見、両者は矛盾しているように考えられるが、ディズニーは現象の核心に迫り、そこに見た本質を発展させるべきだと考えていた。

誇張は全く根拠のない嘘ではなく現実に基づいて行われることで、現実にはありえないことでももっともらしく感じられる。三輪は漫画とアニメーションの歴史は「インクのしみ」と「現実空間の表象＝再現」との葛藤である述べている[127]。初期ディズニーで空中にいるキャラクターが足場のないことに気づいた途端に落下するというものがある。一方で、ピクサー映画の代表作の一つであるトイ・ストーリーでは、物語中盤でバズ・ライトイヤーは自身が飛翔できないおもちゃであるとの事実を突きつけられ、その事実を拒否しようと飛翔を試みるも重力の存在の前に絶望する。しかし、最終的には彼はロケット花火の力を借りて飛翔を果たす。両者ともに現実ではありえない身体浮遊を表現している。しかし、前者では我々はキャラクターが飛翔しているとは感じず、単に落下しない身体をもっていると感じる。これは現実空間では生じえないインクのしみと呼ばれる。一方後者では、重力の描写があったからこそ、バズ・ライトイヤーの飛翔をもっともらしいと感じる。これは現実空間の表象である。本論では後者の例のように、もっともらしさを感じさせる性質を実感性と定義する。

実感するとは、これまでの経験より獲得した現実を予測するためのモデルと目前で生じている現象の合致度が高いと感じることであるといえる。我々は過去の体験の共通点から現実を予測するためのモデルを構築し、ある現象に対峙したときに適切な行動できるように努める。この現実を予測するためのモデルと目前で生じている現象の合致度が高いと現象を現実らしく自然であると感じられる。現実を予測するためのモデルを活用できる体験が実感性のある体験であるといえる。

実感性が高いということは現象の再現性が高いということを必ずしも意味しない。先のバズ・ライトイヤーの飛翔はもっともらしいと感じられ実感性のあるアニメーションであるといえるが、現実にはロケット花火でおもちゃを飛翔させることは困難であり現実の再現性の高いアニメーションとはいえない。

以上より、誇張表現は：1) 現実を必ずしも忠実に伝えない；一方で 2) 現象を分かりやすくする；3) 実感性を高める、表現手法であるといえる。さらに誇張する対象および誇張の方法や度合いを変えることで、表現の幅を広げることができる。本研究では誇張表現を触覚インタラクションの設計・開発に適用することで、触覚インタラクションがユーザにとって分かりやすく実感性のあるものとなり、VR については HCI の体験の質の向上に貢献することを期待する。

## 1.2 本論文の目的および構成

### 1.2.1 誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発

本論文は誇張表現の概念を触覚インタラクションの設計・開発に適用することで現象の再現性は高くないが実感性に優れた体験を実現することを目的とする。そして、設計・開発した触覚インタラクションを基に実感性を向上させるための要件を明らかにすることを目的とする。具体的には、まず誇張表現の分類を行い、設計・開発の指針とするための3つの論理モデルを設定する。次に、3つのモデルに基づいた8つの触覚インタラクションの設計・開発に関する研究について述べる。各研究では個々の研究背景を述べ、それに則した目的を設定し、具体的な触覚インタラクションの実装および評価を行う。そして、3つのモデルおよび8つの研究を総括し、実感性を向上させるための要件を明らかにする。

### 1.2.2 誇張表現の論理モデル

本項では誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発を行うにあたり、誇張表現を分類し、論理構造を見いだす。

前節で述べたとおり、我々は感覚器を通じて外界からの刺激を受容し現実を認識する。VR では感覚器に本質的に同様の刺激を提示することで現実の再構成を行う。つまり次に示すモデルのように感覚  $A$  を本質的に同様な感覚  $A'$  で表現するといえる。

$$A \rightarrow A'$$

この従来の VR での表現を基に本論文では次に示す3つの誇張表現の論理モデルを定義する。また、それぞれのモデルにおいて、漫画・アニメーションの表現技法である漫



符を基にその具体例を挙げ、期待される効果について述べる。なお、漫符とは、現実を基にしたものや現実にはないものの記号的表現の総称である。

### 1.2.2.1 代替モデル

代替モデルでは次に示すように感覚  $A$  を別の感覚  $B$  で代替する。

$$A \rightarrow B$$

代替モデルの漫符の例として、お金に目がくらんでいる状態をキャラクターの目を\$（ドルマーク）に替えて描く表現が挙げられる。これはお金に目がくらんでいるという心情を\$という視覚（記号）で代替している。無論、どんな守銭奴であっても目を見ただけではその人が守銭奴であることは通常判断できない上に、目が記号に変化することは現実には起こりえない。しかし、本表現によってそのキャラクターがお金に目がくらんでいることが分かる。このように代替モデルの利点として、通常感覚  $B$  では感じられない、感じにくい体験を経験できるという点が挙げられる。

### 1.2.2.2 変調モデル

変調モデルでは、感覚  $A$  に操作  $k$  を加えて変調する。

$$A \rightarrow kA$$

変調モデルの漫符の例として、たんこぶが挙げられる。頭等が強く打ち付けられた場合、内出血により患部が膨れあがる。漫符ではこれを肥大化させたり、赤みを増したりして描くことで痛々しさを表現する。現実において、頭等を打ち付けた際の衝撃が小さい場合は視覚的に確認することが難しい小さなたんこぶができる。しかし、漫符では巨大で真っ赤なたんこぶが描かれ衝撃の存在や痛々しさを読者に分かりやすく伝える。変調モデルの利点として、現象の差異が増幅されるのでその現象が分かりやすくなるという点が挙げられる。

### 1.2.2.3 重畳モデル

重畳モデルでは、感覚  $A$  に別の感覚  $B$  を重畳する。

$$A \rightarrow A + B$$

重畳モデルの漫符の例として、怒りマークが挙げられる。怒りマークは十字型やY字型に配置された曲線によって表した記号であり、キャラクターの怒りや力みを表す。元々は力んだときに浮かび上がる血管が明確に描かれたものであり、その点では変調モデルの一種であるといえる。しかし、怒りマークは額や拳等実際に血管が見える部位に加え、キャラクターの近くの空間や無生物（自動車やロボット）等実際に血管が存在しない部位に描かれる。後者においては、怒りマークは現象を鮮明に描くというよりは対象に重畳して比喩的に使われているといえる。このようにして、読者に対象が無生物であっても感情をもって怒っている、力んでいることを伝える。重畳モデルの利点として、現実には組み合わせられない感覚が組み合わせることで、比喩的に体験が分かりやすくなる点が挙げられる。

### 1.2.3 本論文の構成

本論文では本章を含む全6章から構成される。第3章から第5章では、上記のモデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発に関する研究について述べる。各研究では、はじめに個々の背景と目的について述べ、触覚インタラクションの設計・開発、個々の目的に則した評価を行う。各章末では、研究およびモデルを総括する。第6章では、3つのモデルを総括し、明確になった要件を整理することで各研究を振り返る。章末では、今後の展望について論じる。各章の内容の要旨は以下のとおりである。

第1章では、まず触覚インタラクションが注目されるようになった背景について述べ、写実的アプローチの限界について指摘する。次に、漫画やアニメーションに見られる誇張表現について述べ、本論文の目的として「誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発」および「誇張表現に基づいた触覚インタラクションの実感性を向上するための要件を明らかにすること」を設定する。そして、誇張表現の論理的な分類を行い、触覚インタラクションの設計・開発の指針とするための3つのモデル（代替モデル、変調モデル、重畳モデル）を見いだす。

第2章では、本論文で扱う触覚について定義する。触覚に関する基礎的な生理学的、心理学的知見に関して述べ、次章以降で述べる触覚インタラクションの設計・開発において必要な知見を共有する。

第3章では、代替モデルに基づいた2つの触覚インタラクションの設計・開発について述べる。1つ目は肘部の屈伸運動に伴ってロータリスイッチを回した時に生じる周期的な触覚フィードバック（カチカチ感）を提示するカチカチ感提示装置の設計・開発である。本装置によって視覚的運動知覚が困難な状況において触覚的運動知覚を拡張することでユーザの身体姿勢の制御の向上を試みる。2つ目は視覚から材質感を提示する手法 Visual Vibration の設計・開発である。本手法では、現実では聴覚・触覚で感じられる高周波数振動を視覚で感じられるように変調して疑似触覚提示を行う。本手法のケーススタディとして物体を叩いた時に生じる振動を取り上げ、視覚的な振動提示による材質感提示を試みる。

第4章では、変調モデルに基づいた3つの触覚インタラクションの設計・開発について述べる。1つ目は叩き動作に対して振動提示することでタッチスクリーンが異なる材質になったかのような体験を提供する HaCHIStick & HACHISStack の設計・開発である。本システムは時間応答性に優れており、叩いた瞬間に振動提示が可能である。そのため、ユーザにとっては叩いた対象の材質が変わったように感じられる。2つ目は歯磨き音を変調して提示することで歯磨きの快感および達成感を増強する拡張歯ブラシの設計・開発である。羊皮紙錯覚（手を擦った際に生じる音の高周波成分を強調すると手のひらが乾いた紙のように感じられる）を利用して汚れている、美化されているといった歯の状態を疑似的に再現し、歯磨きの体験を拡張する。3つ目は徳利を傾けた際に内容液の流出によるトクトクという振動（トクトク感）提示の設計・開発である。実際に徳利から液体が流出する際に生じる振動を計測、モデリングし、実際に液体を注ぐことなくトクトク感を再現する。実験的に構築した振動モデルをもとに、粘性感および残量感を再現する。

第5章では、重畳モデルに基づいた3つの触覚インタラクションの設計・開発について述べる。1つ目は前章で述べたトクトク感を実際のペットボトルで液体を注ぐ動作に重畳するトクトク感重畳の設計・開発である。トクトク感重畳によって注がれる液体の量の錯誤効果を示し、飲食体験の触覚的演出の可能性を示す。2つ目は関節部の屈伸運動に伴って振動を提示することで関節が異なる材質になったかのような体験を提供する Jointonation の設計・開発である。本システムによって、サイエンスフィクションに登場するゴム人間やロボットに視聴覚に加え触覚的にも変身したかのような体験を提供する。3つ目はタッチスクリーン上でのユーザの動作に対して引力提示を行う装置 VacuumTouch の設計・開発である。本装置は引力提示によってタッチスクリーン上に摩擦感を重畳する。これにより例えばタッチスクリーン上に擬似的な引っかかりをつくりだし、ユーザの操作の補助を行う。

第6章では、3つの誇張表現の論理モデルおよび8つの触覚インタラクションに関する研究を総括する。各々研究を再評価し、課題を整理することで誇張表現に基づいた触覚インタラクションの実感性向上のための要件を明らかにする。そして、本論文の成果を元に誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発に関する研究の今後の展望について論じる。

## 第2章

# 触覚の生理・心理学的知見および分類

本章では本論文が対象とするヒトの触覚に関する基礎的な生理学，心理学的知見 [132][172]に関して述べるとともに，本論文で用いる用語を定義する。

### 2.1 触覚

紀元前4世紀のアリストテレスの時代，視覚，聴覚，味覚，嗅覚につぐ第五番目の感覚は皮膚の感覚，ハペーと呼ばれていた[70]。一方で他の4つの感覚は特殊な器官(目，耳，舌，鼻)がそれぞれ発達していたが，熱い，冷たい，固形，流動…と多くの相互関係が含まれていて種類が多く，触覚を引き起こす刺激が何であるか，受容する仕組みが何であるかが明確ではなかった。したがってこれを一つの感覚として良いも定まっておらず，「皮膚あるいは肉という等質的な構造を介して経験する感覚という意味でまとめたもの」と考えられていた。

今日，日本の生理学では第五番目の感覚を体性感覚(somatic sensation)と呼んでいる。体性感覚の定義は「身体の表層組織(皮膚や粘膜)や，深部組織(筋，腱，関節)にある受容器が刺激され生じる感覚」である。本論文では表層組織で生じる感覚を皮膚感覚(cutaneous sensation)，深部組織で生じる感覚を固有受容感覚(proprioceptive sensation)と呼ぶ(図2-1)。

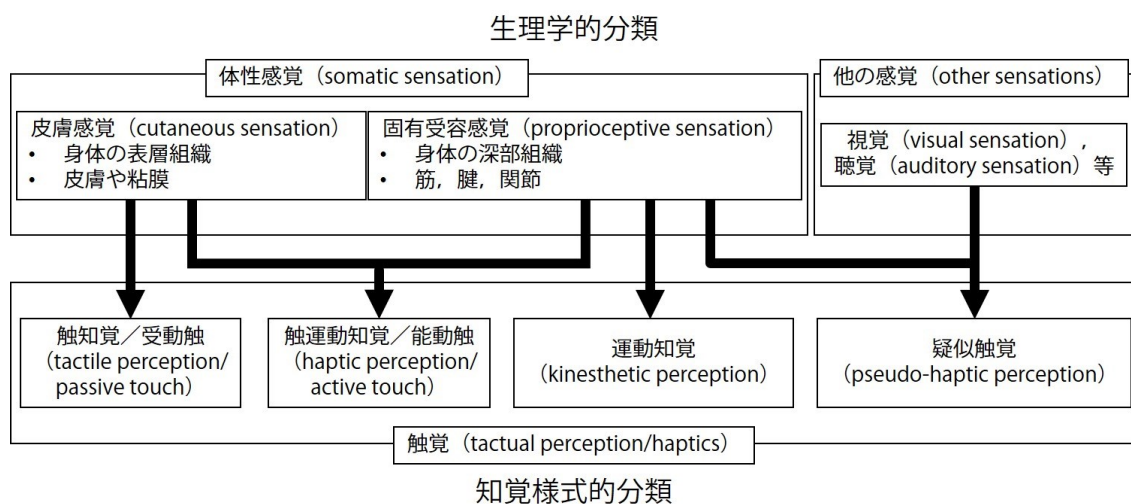


図 2-1 触覚の生理学的・知覚様式的分類

以上の生理学的な分類に加え，知覚様式によって触覚(tactual perception/haptics)を分類することもできる(図2-1)。ヒトが外界の物体を触覚的に知覚する時，指や腕等の身体を能動的に動かす。この時，皮膚感覚と固有受容感覚は密接に関係する。この二つの感覚の関係に対応して，触覚の知覚様式を3つに分類することができる。第一の触覚は触知覚(tactile perception)であり，特に固有受容感覚を伴わず皮膚感覚のみによる知覚である。触知覚は受動的に物体に触れられることから受動触(passive touch)とも呼ば

れる。第二の触覚は触運動知覚 (haptic perception) であり、皮膚感覚と運動感覚が共に働くことで得られる。触運動知覚は能動的に物体に触れることから能動触 (active touch) とも呼ばれる。第三の触覚は運動知覚 (kinesthetic perception) であり、皮膚感覚によらない固有受容感覚のみの知覚である。さらに例外的に皮膚感覚あるいは固有受容感覚が刺激されていない場合でも他の視覚や聴覚刺激等によって触覚が生起することがある。本論文ではこれを第四の触覚、疑似触覚 (pseudo-haptic perception) とする。

前章でも述べたとおり、触覚は他の感覚と比較して最も特異な点はその知覚に運動が密接に含まれることである。Katz は 20 世紀に受動触は日常生活ではほぼ生じないことから能動触に焦点を当て、能動的に触れることで知覚が外界に向けられることを指摘した[70][80]。Katz は物体表面の粗さ知覚において、能動的に触れた時の方が弁別能力に優れることを示す等、能動触の重要性を主張した。その後、Gibson は形状知覚において手指の動きが重要であることを指摘した[41][42][70]。知覚としての不変性に言及し、皮膚感覚のみではなく固有受容感覚を含む複合的な知覚であるハプティック系と呼ばれる能動触の概念を提案した。

前章で述べたとおり、VR や HCI において触覚インタラクションが期待される理由の一つがこの運動を伴うという能動性である。したがって、本研究では 4 つの触覚分類のうち運動が伴うもの、つまり固有受容感覚に関わる 3 つの触覚 (触運動知覚、運動知覚、疑似触覚) に関する触覚インタラクションの設計・開発を行う。

## 2.2 皮膚感覚

ヒトの身体表面は皮膚で覆われている。皮膚に刺激が与えられた時に生じる感覚が皮膚感覚である。皮膚の機械的変形は皮膚内部にある機械受容器で受容される。機械受容器内部には、末梢から中枢へと触覚情報を伝える一次求心性神経繊維の末端が侵入している。神経生理学の分野では、単一の一次求心性神経繊維と、それに結合する機械受容器群の組合せを機械受容ユニットと呼ぶ。皮膚に機械的刺激が与えられると、周辺の皮膚組織に歪みが生じる。これを機械受容ユニットが感受し、固有の神経信号が生成され、大部分は脊髄や視床などを経由して大脳を中心溝後部にある中心後回に伝えられる。中心後回の皮質領域 (一次体性感覚野) では、あらゆる種類の体性感覚情報が入力され、統合的・階層的な処理が行われる。一次体性感覚野で処理された情報は、二次体性感覚野や頭頂連合野などのより高次の皮質領域での情報処理を経て、運動制御に関与し、あるいは主観的感覚を呼び起こす。

ヒトの皮膚は無毛部と有毛部に分けることができ、ヒトが外界とやりとりする際には、皮膚が肥厚した 3 つの無毛部である手指、手掌および足底が主要な役割を演じる。そこには、多量の情報を受容するために、機械受容器が集中していて、それらの形態的分類もルフィニ小体を除き明確である。図 2-2 はヒトの手掌や足底などの肥厚した皮膚無毛部の断面を示している。図中記号 Mk, Mr, Pc および R が示す機械受容器メルケル盤、マイスナー小体、パチニ小体およびルフィニ小体は後に説明する機械受容ユニットの特性にその特徴を大いに反映している。

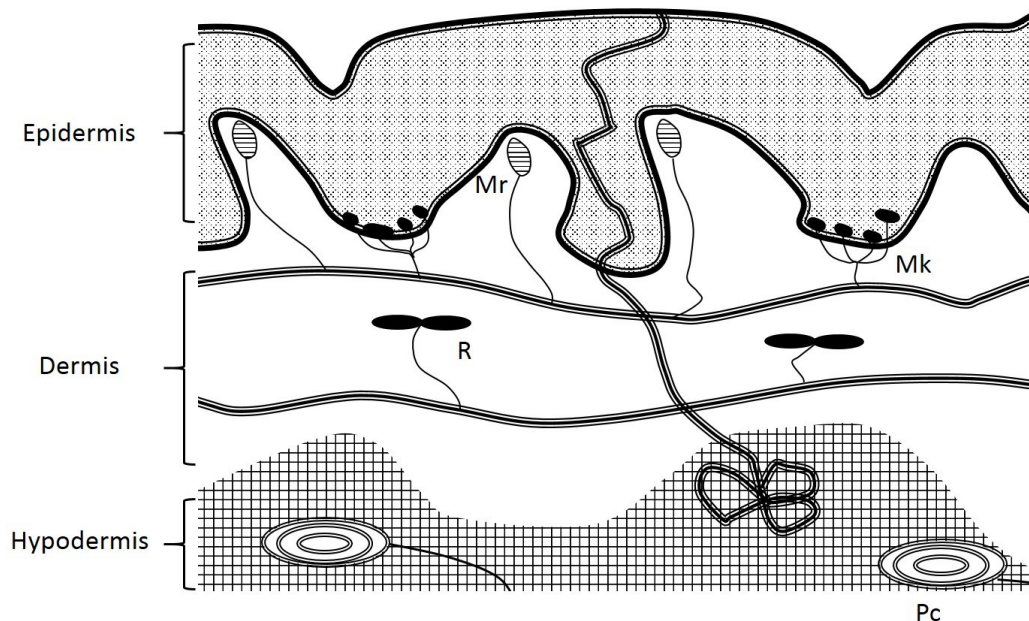


図 2-2 ヒトの手掌や足底などの肥厚した皮膚無毛部の断面 ([172]を基に改変) : 図中の記号 Mk, Mr, Pc および R はそれぞれメルケル盤, マイスナー小体, パチニ小体およびルフィニ小体の存在位置を示している. 実際にはパチニ小体が真皮底部にもみられるといったように, Pc および R でかなりの位置変動がある.

#### メルケル盤 (Merkel disk)

メルケル盤は皮膚下 0.9mm に密に存在する. メルケル盤は, 他の 3 つの機械受容器とは構造が異なり, メルケル細胞と神経終末が狭い隙間を挟んで対置する構造となっており, 唯一の細胞性受容器である. 静的な歪みに応答し, 発火頻度はその大きさに比例する. 単独の活動では純粋な圧覚を生成する.

#### マイスナー小体 (Meissner corpuscle)

マイスナー小体は皮膚下 0.7mm に密に存在する. 低周波振動 (15~100Hz) に応答し, 30Hz で共振する. 単独の活動では振動感覚を生成し, パタパタ感を生じる. なお, マイスナー小体は有毛部には存在しない.

#### パチニ小体 (Pacini corpuscle)

パチニ小体は皮膚下 2mm 以上の深部にまばらに存在する. 高周波振動 (60~800Hz) に応答し, 240Hz で共振する. 単独の活動では音叉に触れたような振動感覚や指全体のしびれを生成する.

#### ルフィニ小体 (Ruffini corpuscle)

ルフィニ小体は皮膚下 2mm 以上の深部にまばらに存在する. 静的な横ずれに応答し, 発火頻度はその大きさに比例する. 単独の活動では感覚を生じない.

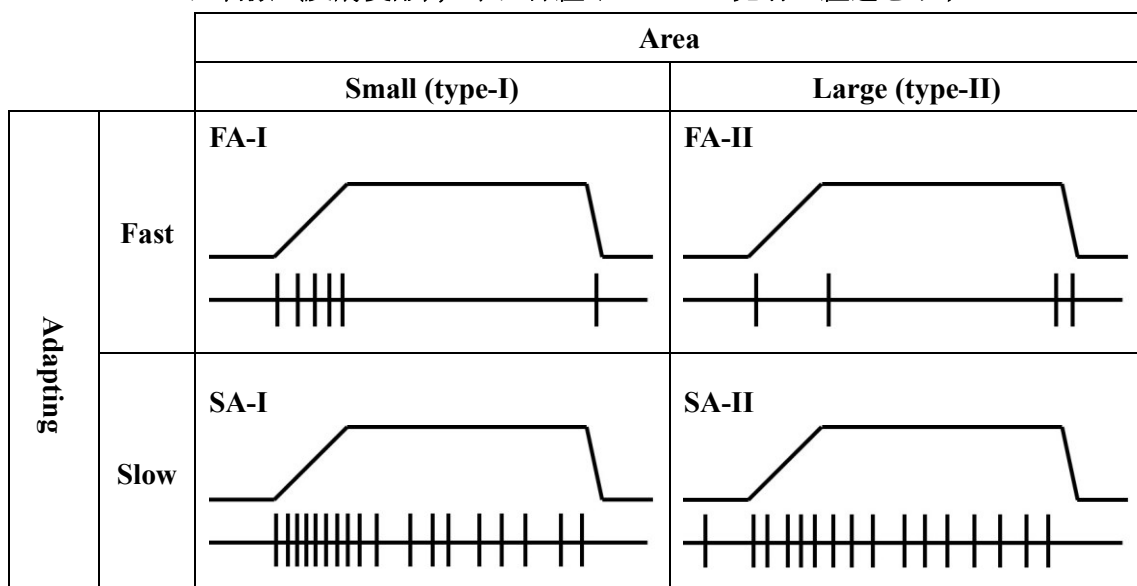
機械受容ユニットに微小神経電図法を適用し, 微細なフィラメントなどを用いて皮膚を軽微に刺激してその活動を調べると, 神経発射が記録される刺激位置の集合は, 皮膚上に閉じた領域を形成する. この皮膚上領域が機械受容ユニットである. 機械受容ユニ

ットは、領域が狭くて境界が鮮明な I 型と、領域が広くて境界がはっきりしない II 型とに二分される。また領域がプローブで押し込まれた際、プローブの動きに応答する速順応 (fast adapting: FA) 型と、押し込んだ状態でも応答が持続する遅順応 (slowly adapting: SA) 型に二分される。機械受容ユニットは受容野と順応性によって 4 つの組み合わせに分類される。各機械受容ユニットの特性には、皮膚および機械受容器の特徴が反映されている。表 2-1 に各機械受容ユニットに対応する機械受容器、各機械受容ユニットの順応性および受容野の大きさを示す。表 2-2 は 4 種類の機械受容ユニットの典型的な順応パターンである。それぞれ表 2-1 に示した特性を反映している。

表 2-1 ヒトの手指および手掌無毛部内に投射する 4 つの機械受容ユニット ([172]を基に改変)

Mechanosensitive unit	Sensory receptor	Adaptability	Area
FA-I	Meissner corpuscle	Fast adaptive, velocity response	Ellipse of 3-5mm in diameter
SA-I	Merkel disk	Slow adaptive, velocity and pressure response	Ellipse of 1-3mm in diameter
FA-II	Pacinien corpuscle	Fast adaptive, acceleration response	At least whole finger
SA-II	Ruffini corpuscle	Slow adaptive, pressure (stretch) response	5 times as large as FA-I

表 2-2 ヒトの手指皮膚，機械受容ユニットの 4 型 ([132]を基に改変) :  
上は刺激 (皮膚変形)，下は神経インパルス発射の経過を示す。



マスキング刺激、皮膚の冷却、刺激プローブの形状変化などを巧妙に組み合わせた心理物理実験によって、4つの振動閾検出曲線が発見された。4種類の振動検出チャンネルがあるという意味で、4チャンネル・モデルと呼ばれるが、これらは前述の4つの機械受容ユニットに対応している。図 2-3 に4つの振動閾検出曲線を示す。

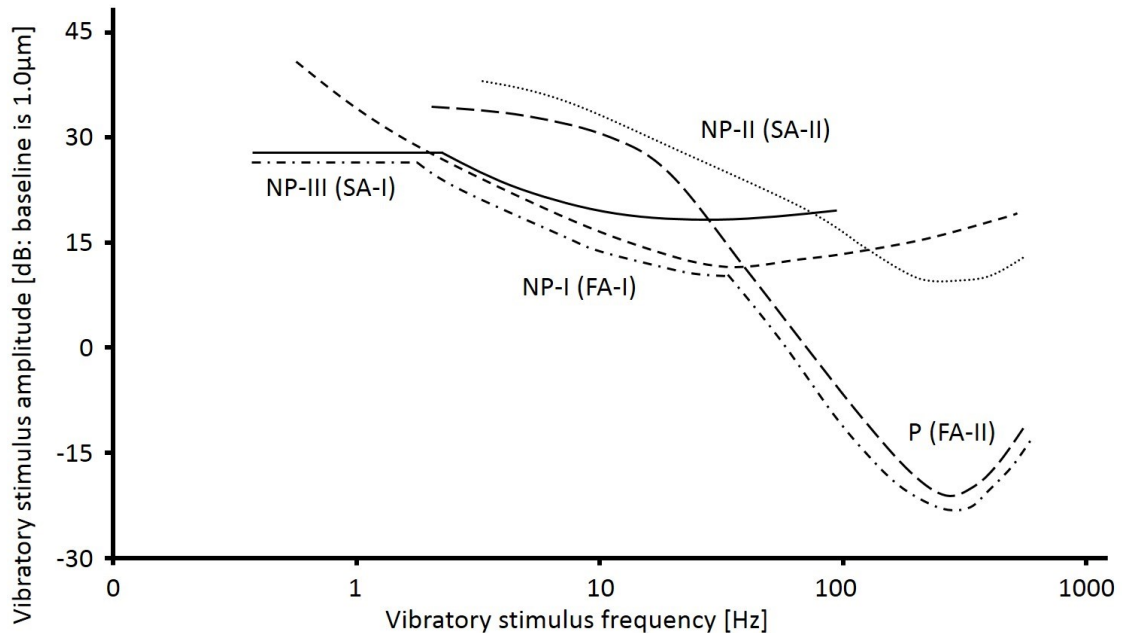


図 2-3 振動閾検出曲線 ([172]を基に改変)

図中の P はパチニを，NP は非パチニを意味する。括弧内は，対応すると考えられている機械受容ユニット，少し下方にずらして描かれている4つの曲線の下側包絡線が，通常のヒトの振動感応曲線となる。触れている対象が振動しているかどうかの感度が振動感覚であり，皮膚感覚によるものは地震や乗車時のゆれなど体全体で受けるものとは区別される。振動感覚の閾値は皮膚に振動を提示した際の最小の振幅で示される。計測条件の多くは機械的振動子を正弦波で駆動することで調べられる。



## 第3章

# 代替モデルに基づいた触覚インタラクション

本章では著者がこれまでに設計・開発した触覚インタラクションのうち、感覚  $A$  を別の感覚  $B$  で代替する代替モデルに基づく 2 つの研究について述べる。代替モデルでは現実には感覚  $B$  では感じられない、感じにくい体験を経験できるという効果が期待される。一つ目はカチカチ感による触覚的運動知覚の拡張に関する研究である (3.1 節)。本研究では、通常主に視覚と触覚で行われる肘屈伸量知覚のうち視覚をカチカチ感提示によって代替することを試みる。二つ目は Visual Vibration による視覚的振動提示手法に関する研究である (3.2 節)。本研究では、通常触覚や聴覚で知覚される振動を視覚で知覚できるように変調して代替することを試みる。

### 3.1 カチカチ感: 屈伸運動に応じた周期的な触覚提示による運動知覚の拡張

本研究では、肘部の屈伸運動に伴ってロータリスイッチを回した時に生じる周期的な触覚 (カチカチ感) を提示するカチカチ感提示装置の設計・開発する。本装置によって、通常指先において生起するロータリスイッチの位置知覚の拡張能力をユーザの肘部の屈伸運動に適用し、触覚的運動知覚の拡張を試みる。

#### 3.1.1 研究背景

スポーツや楽器演奏等において、正しい型に沿った運動を行うことは競技および演奏パフォーマンス向上のために重要である。筋力トレーニングにおいても正しい型での訓練が重要であり、誤った型で行うと所望の効果が得られず、最悪の場合、身体を痛め怪我につながる恐れもある [27][167]。しかし、正しい運動を再現することは難しく、頭の中で正しい姿勢をイメージしそのとおりの姿勢をとっているつもりでも、実際には誤った姿勢になってしまうことが多い。特に筋肉が疲労すると、無意識に他の筋肉に負荷を逃がそうとしてしまい姿勢が崩れてしまうことがある。

この原因として、触覚的運動知覚における触覚手がかりが不鮮明であることが挙げられる。ヒトは自らの身体姿勢や力加減等を主に視覚・触覚手がかりを統合的に処理して把握する。身体姿勢の制御において、視覚手がかりは触覚手がかりよりも信頼性があり、優位に寄与することが知られている [104]。しかし、スポーツや楽器演奏では周囲の状況 (敵味方の位置や指揮者の指示) を目視で確認する必要があり、常に視覚手がかりに注意を向けることは困難である。そのため触覚手がかりを頼りに運動しなければならず、これが所望の身体姿勢を保てないことに寄与していると考えられる。

本研究は、触覚提示により触覚的運動知覚を拡張することが目的である。これを実現するために、ロータリスイッチを回転させた時に生じる周期的な触刺激、カチカチ感をユーザの肘部屈伸運動に合わせて提示することで正しい身体姿勢制御の補助を試みる。また、ユーザが肘の角度をカチカチ感を頼りに行うようになることを期待する。これに

より、カチカチ感の提示周期を操作することでユーザが肘屈伸量を錯誤するようになると考えられる。この効果は、例えば少量の運動であっても大きく運動したように思わせることが可能となり、リハビリテーションや遠隔操縦への応用が期待できる。本節では、直接このような錯誤効果の検証までは踏み込まないが、カチカチ感提示による触覚的運動知覚の拡張の可能性を検証する。

本節では、まず触覚提示を用いた運動教示手法に関する先行研究について述べ、本研究の触覚教示研究分野における立ち位置を示す。次にカムスイッチ機構を用いたカチカチ感提示原理および実装について述べる。そして、本手法による触覚的運動知覚が拡張効果を検証する。

### 3.1.2 先行研究

近年、より効果的な運動教示手法として触覚提示が着目されている。例えば Van Erp らは振動提示によりボートを漕ぐ動作の運動教示を試みた。訓練者の身体に固定した複数の振動子を用いて、どこを動かすか (where to move)、いつ動かすか (when to move) といった運動教示を行った[175]。同様の触覚提示による運動教示は他にもサッカーやダンス[175]、軍用航空機の操作[174]、バイオリン演奏[173]、ドラム演奏[65]、リハビリテーション[103]等がある。上記の研究を含むこれまでの知見[34][45][102]から、運動教示に触覚提示を用いる利点として次の2点が挙げられる。一点目は、視覚を他の運動知覚以外のタスクに使用できることである。二点目は、ヒトの皮膚は全身に広がっているため所望の身体部位に直接触覚提示でき、ユーザは直感的に動かすべき身体部位を把握できることである。

振動モータやボイルコイルアクチュエータは小型・軽量であるため運動を阻害せずに身体へ装着ができ、特に後者は振動周波数によって提示刺激に階調性をもたせられるといった利点から振動提示が運動教示にしばしば用いられる。また、筆記運動教示[55][150]や遠隔操作[148]等の力加減が重要であったり、大きな身体運動が少なかったりするような運動の教示には PHANToM[119]等の力提示装置も用いられている。

一方で、触覚提示による運動教示はその設計によって運動を習得するという本来の目的を達成できないことがある。Linden らはバイオリン演奏訓練者の肘・手首・腰に振動モータを装着し、訓練者が誤った姿勢をとった時その身体部位を振動刺激することで姿勢教示を行った[173]。しかし、訓練者は演奏姿勢の誤りを意味する振動を避けることに尽力してしまい、演奏技能習得という本来の目的に集中できなくなったことも指摘されている。これは訓練者が触覚提示に対して従属的になってしまい、運動の目的がバイオリン演奏そのものではなく、振動を避けることになっていったことが原因であると考えられる。

Saga らは運動学習において訓練者の能動性が重要であると主張している[150]。筆記運動における従来の触覚的運動教示は主に所望の運動方向に誘導する力を提示するというものであった。Saga らは所望の運動方向とは反対の方向に力を提示し、訓練者がそれを打ち消すように力を加えて運動することで訓練者の能動性を引き出す手法を開発した。従来手法との比較の結果、Saga らの手法は高い教示効果を示した。Lee らはこの概念を発展させ、運動を阻害する触覚的ノイズ (筆記方向とは無関係にランダムの方

向、強さで提示される力)を提示することで、さらに高い教示効果を実現した[99]。以上のように、触覚の運動教示において能動性が重要であるといえる。

一方で、本節の目的は触覚提示による触覚的運動知覚の拡張である。これにより訓練者自身に誤りを気づかせ、訓練者自身の力で修正させることで、間接的に運動教示を実現するというものである。言い換えると、先行研究はより正確な運動を指示するバーチャルな先生をつくり出す手法であったのに対し、本手法は訓練者自身の運動感覚を増強し、学習能力を高めてバーチャルに優秀な生徒をつくり出す手法であるといえる。

本手法では運動後に触覚提示を行う。運動前に触覚提示して訓練者に身体を動かすきっかけを提示するのではなく、運動後に触覚提示することで身体がどのように動いているか、あるいはどのように動いたかを把握させる。これにより触覚的運動知覚の拡張を試みる。本研究では運動後に触覚提示を行う機構としてロータリスイッチに着目した。

### 3.1.3 カチカチ感提示装置

#### 3.1.3.1 カチカチ感

自動車の空調操作ダイヤルなどに利用されているロータリスイッチを手で回すと、カチカチとした周期的な触覚が手に返される。このカチカチ感は、周期的な抵抗感の変化と衝撃感で構成されており[153]、ダイヤルの操作性向上に応用されている。例えば自動車内のダッシュボードに取り付けられたロータリスイッチによって、運転者は手元を見ることなくダイヤルを所望の位置に調整することができる[5]。これは、カチカチ感によって空間に信頼できる明示的な尺度ができたためといえる。また、ヒトがロータリスイッチの摩擦粘性感を知覚できる閾値は、運転中であるかどうかに関わらず一定であるという報告もあり、複数のタスクを同時に行なっても容易に知覚できる触覚刺激であるといえる[85]。

このカチカチ感は運動の結果を伝える触覚手がかりであり、触覚的運動知覚の拡張であるといえる。カチカチ感を関節部屈伸運動に適用することで、関節部の触覚的運動知覚を拡張できると考えた。カチカチ感は、自己運動を自己計測するための客観的な指標としても機能すると考えられる。例えば腕を60度曲げるという教示に対し、「1カチが20度」であることを知っていれば、「3カチ曲げる」ことで所望の姿勢を取ることができる。また指導者にとっても「もう1カチ伸ばしなさい」という教示も可能となり、指導者と訓練者のコミュニケーションを円滑にするという応用も考えられる。

#### 3.1.3.2 実装

ロータリスイッチ等に採用されているカムスイッチ機構を参考に、図 3-1 に示すカチカチ感提示装置を開発した。本装置は円形のジョイント部、上腕リンクおよび前腕リンクから構成される。ジョイントはアクリロニトリルブタジエンスチレン (Acrylonitrile Butadiene Styrene: ABS) 樹脂製、リンクはアクリル製である。装置の全長は205mm、重さは105gである。

ジョイントの内部構造を図 3-2 左に示す。ジョイント部は外部のジョイント A (図 3-2 左青色部) と内部のジョイント B (図 3-2 左赤色部)、ステンレス製押しばねおよび2つのステンレス球から構成されている。ジョイント A、ジョイント B はそれぞれ上腕

リンク・前腕リンクに接続されており、互いに独立して最大約 150 度回転する。ジョイント A の内径は 50mm で、内径上には最大高さ 3mm のなめらかな凸（カム）が 20 度ごとに合計 18 個ある。ジョイント B は押しばねとその両端に 2 つのステンレス球を内蔵しており、ジョイント A に格納されている。2 つのリンクには ABS 樹脂製の腕部装着用アタッチメントが固定されており、皮膚接触面にはウレタンシートが貼付されている。アタッチメントは面ファスナー式（マジックテープ）バンドで前腕・上腕に固定されている。

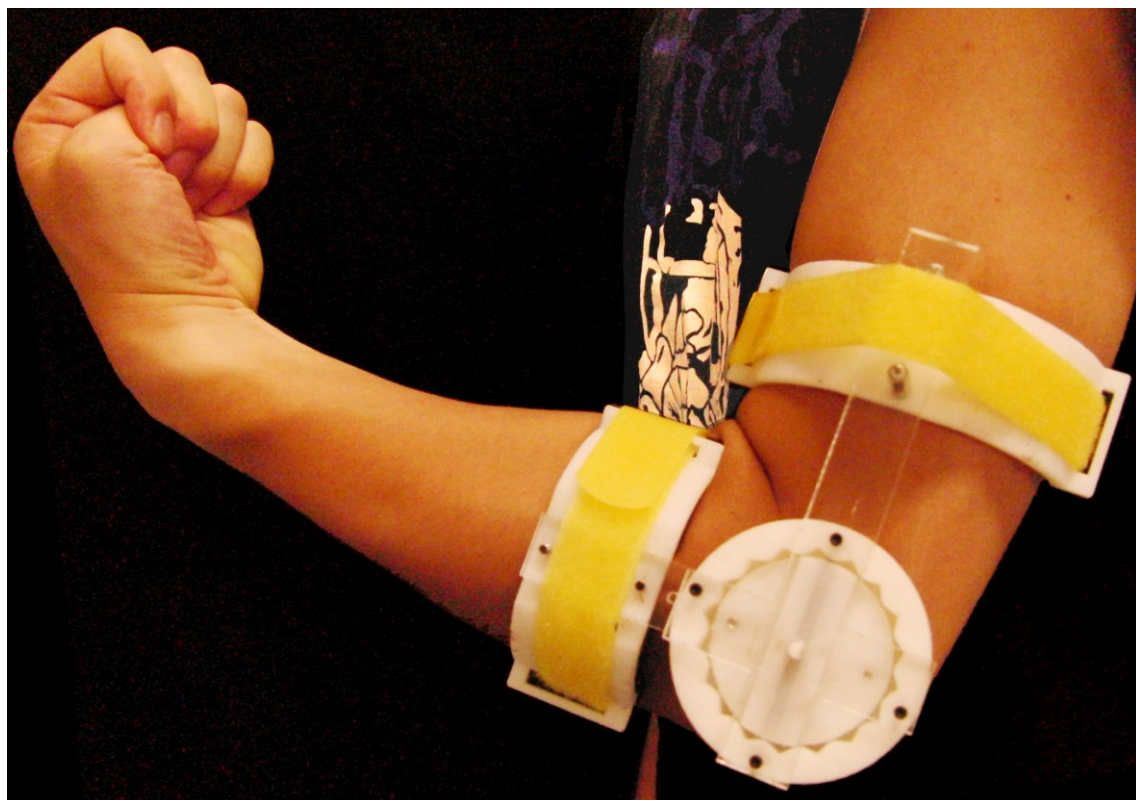


図 3-1 カチカチ感提示装置

本装置のカチカチ感提示原理を図 3-2 右に示す。初期状態で球はジョイント A のカム間の谷にある（図 3-2 右-1）。ジョイント B を肘屈伸により回転させると、カムによってばねが押し縮められる（図 3-2 右-2）。その際ばねの弾性力に応じて球に遠心方向の力が加えられ、球と凸の間に回転方向と反対の方向に力が生じる。この反力に逆らって肘屈伸を続けると、球はカムの頂点を乗り越える。この時縮んでいたばねの弾性エネルギーが解放され、球を遠心方向に押し出す（図 3-2 右-3）。同時に、反力が反転して押し出された球は隣接する凸間の谷に衝突し、「カチッ」という衝撃が生じる。

本装置は肘が 20 度屈伸する度にカチカチ感を提示し、最大約 150 度回転する。ただし、装置を限界まで伸展させた状態から最初に屈伸させる時だけは 10 度でカチカチ感が提示される。したがって、10 度、30 度、50 度…といった間隔でカチカチ感が提示される。

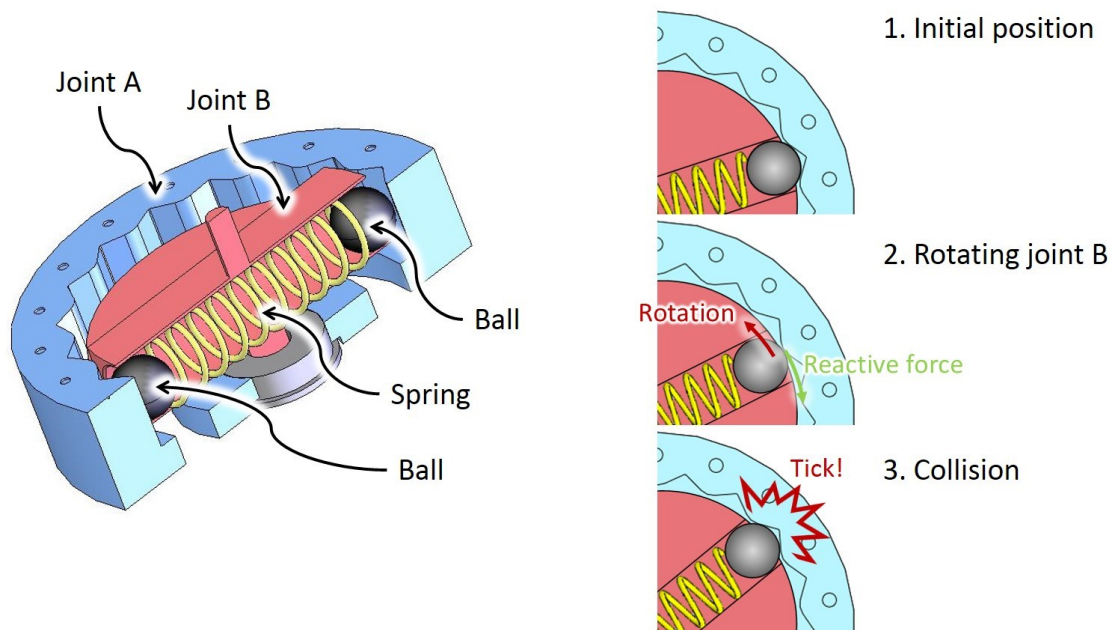


図 3-2 左) ジョイント内部構造, 右) カムスイッチ機構を用いたカチカチ感提示原理

### 3.1.4 実験 1 : 腕立て伏せにおけるカチカチ感提示の効果検証

本実験では、カチカチ感提示による触覚的運動知覚の拡張を検証するために、腕立て伏せにおけるカチカチ感提示の有効性を検証する。具体的には事前に腕立て伏せの正しい型を教示した状態で、カチカチ感提示の有無が被験者の腕立て伏せの型に影響を及ぼすか観察する。

#### 3.1.4.1 腕立て伏せ

本実験では運動教示の対象として腕立て伏せ（腕立て伏臥腕屈伸）を取り上げた。腕を完全に伸展させた状態から胸が床につく直前まで可能な限り大きく肘を屈曲させることを正しい姿勢とする[27]等、腕立て伏せの正しい型には諸説あるが、いずれも肩や腰を動かさずに肘を屈伸させることが望まれる。腕立て伏せは自重を利用して上腕三頭筋や大胸筋を鍛えることにおいて有効であり、専用のトレーニング器具を必要としないことから、誰でも気軽に行える筋力トレーニングであるといえる。腕立て伏せは運動強度が高く、疲れてくると無意識に他の筋肉に負荷を逃がそうとして肘を屈伸せずに肩や腰を動かすなど、誤った姿勢になることが多い。

これに対し、肘関節にカチカチ感提示によって肘の屈伸状態を鮮明に知覚させることで、疲れた状況において十分に屈伸できていないことを教示する。これにより疲れた状況においても十分に肘を屈伸させることを補助する。

#### 3.1.4.2 セットアップ

本実験のセットアップのを図 3-3 に示す。本実験では光学式フルボディモーションキャプチャシステム（NaturalPoint, OptiTrack）およびその専用カメラ（NaturalPoint, FLEX:V100R2, 100fps）を用いて、被験者の左肩に固定した直径 11mm のマーカを撮影

し、その三次元座標を計測した。カメラは3台用い、それぞれを被験者の前方、斜め前方、側方に設置して常に全カメラの視野に被験者左肩のマーカが写るようにした。したがって、本実験で計測したのは厳密には肘の屈伸角度ではなく、肩の位置であったが、腕立て伏せにおいて肘を屈伸しない限り肩の位置は変動しないので、実験目的を達成する上で問題はないと考えられる。

本実験ではカチカチ感提示の有無が肘の屈伸角度に及ぼす影響を検証するために、カチカチ感提示装置と、同装置からばねと球を取り除いたカチカチ感を提示しない装置の2つを用いた2条件を設定した。腕立て伏せにおける肘屈伸角度の目標値に90度(90度屈伸)と可能な限り曲げるMAX屈伸の2条件を設定した。

### 3.1.4.3 実験手続き

まず、実験者は被験者の両腕にカチカチ感提示装置を装着させた。この時、痛みがなく肘がスムーズに屈伸することを確認した。実験者は被験者に肘を自由に屈伸させ、しばらくカチカチ感を体感するように指示した。装置を一度取り外した後も同位置に再装着できるように、被験者の腕の装着位置に水性ペンで印をつけた。

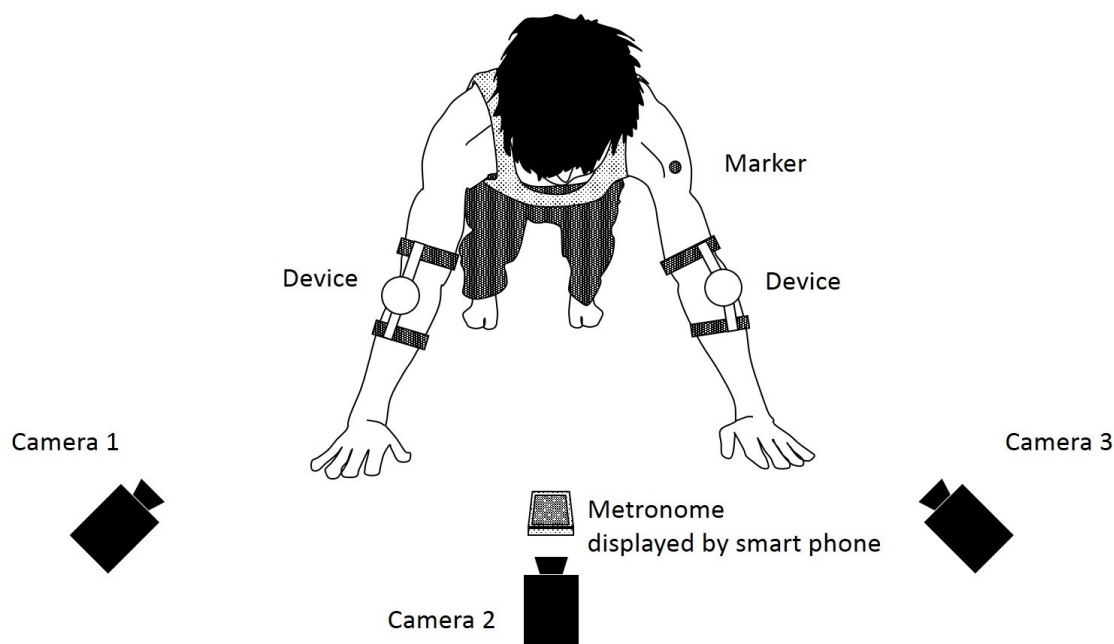


図 3-3 実験セットアップ

次に、実験者は被験者に腕立て伏せの姿勢をとらせた。両手の位置は肘を完全に伸展させた状態で肩幅程度に開き、胸が延長上に並ぶようにした。また両足は約15cm開くようにした。この状態を基本姿勢とし、実験者は被験者の両手足が置かれている位置にテープで印をつけた。その後、被験者に楽な姿勢をとらせ、装置を取り外した。

そして、実験者は被験者に目標角度2条件のいずれかで腕立て伏せをするように指示した。被験者は実験者が指示した装置を装着し基本姿勢をとった。実験者は被験者の目の前にスマートフォン (Apple, iPhone3GS) を置き、画面上に30bpm (1往復4秒) の周期で往復する無音のメトロノーム (MarketWall.com, Metronome) を表示した。被験者に

このメトロノームを注視するように指示し、リズムに合わせて2秒で肘を屈曲させ、次の2秒で伸展させるように指示した。被験者は実験者の合図で肘の屈曲を開始し、3回連続で肘屈伸を行った。腕立て伏せ終了後、被験者は楽な姿勢をとり装置を取り外した。これを1試行とした。その後、被験者は再び実験者の指示した装置を装着し、同様の手順で試行を行った。

被験者一人あたり8試行（目標角度2条件（90度屈伸，MAX屈伸）×カチカチ感提示2条件（あり，なし）×繰り返し2試行）を行った。試行条件は被験者ごとに異なっていた。本実験には8名（全員男性；21から25歳）が参加した。

### 3.1.4.4 実験結果・考察

計測結果の一例を図3-4に示す。x軸は時間、y軸は肩の高さを示す。以下の分析は肩の高さの振幅（計測結果の最大値と最小値の差）に対して行った。

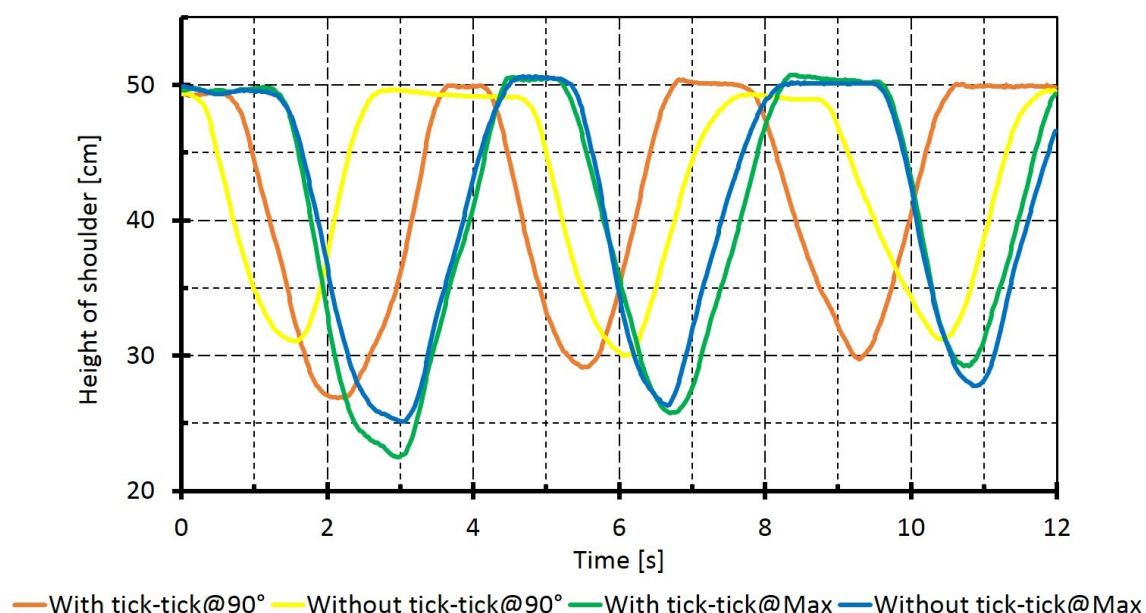


図 3-4 計測結果の一例：  
x 軸は時間，y 軸は肩の高さを示す。

肩の高さの振幅に対し、3要因（試行回数2条件×目標角度2条件×カチカチ感提示2条件）の被験者内分散分析を行った。その結果、目標角度要因の主効果において有意差が認められた ( $F(1, 7)=59.24, p<0.001$ )。また、カチカチ感提示要因の主効果において有意傾向が見られた ( $F(1, 7)=4.50, p<0.1$ )。一方で試行回数の主効果 ( $F(1, 7)=2.81, p=0.138$ ) および相互効果において有意差は認められなかった。本分析結果を考慮して、目標角度2条件およびカチカチ感提示2条件における振幅の平均値および標準偏差を図3-5に示す。

実験前の仮説として、カチカチ感提示によって疲れた状況において十分に屈伸できていないことを教示し、被験者に疲れた状況においても十分に肘を屈伸させることを予想していた。しかし、次の2点において本実験結果は仮説を支持しなかった。1点目は、

腕立て伏せ 3 回を 2 試行というタスクでは被験者が十分に疲労しなかった点である。そのため、カチカチ感提示なし条件においても無意識に屈伸ができていないという状況が再現できてなかった。一方で予備実験において、一部の被験者は腕立て伏せを行うこと自体が筋力的に困難で姿勢が著しく崩れてしまい、肘屈伸を正確に計測することが不可能であった。したがって、被験者の筋力に応じた腕立て伏せの回数を設定する等の処置が必要であったと考えられる。

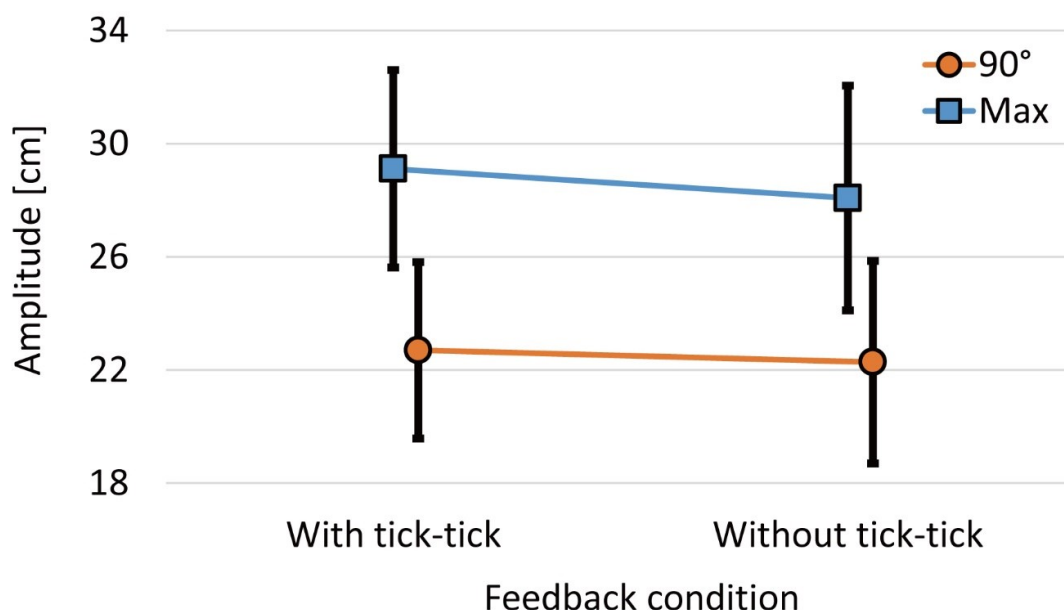


図 3-5 実験 1 結果：  
目標角度 2 条件およびカチカチ感提示 2 条件における肩の振幅の平均値。  
エラーバーは標準偏差を示す。

2 点目は、カチカチ感提示あり条件において肘屈伸量が増加する傾向があった点である。90 度屈伸条件においては、カチカチ感提示によって目標の姿勢に近づいたため屈伸量が減少したとも解釈できる。本実験では肩の高さを計測したため肘屈伸角度が 90 度に近くなると結論づけることはできないが、カチカチ感提示には目標の姿勢をとりやすくする効果があると考えられる。一方で、可能な限り肘を屈伸させる MAX 屈伸条件においても屈伸量が増加する傾向であったことから、カチカチ感提示には肘屈伸を増加させる効果があると考えられる。これは、被験者はカチカチ感提示によって肘の屈伸量がより精細に把握できるようになり、結果として限界直前まで屈伸を行い肘屈伸量が増加したためと考えられる。以上より、カチカチ感提示による肘屈伸量の減少傾向に関して：1)目標の姿勢をとりやすくなった；もしくは2)被験者が肘屈伸量を把握できるようになった、といった 2 つの可能性が考えられる。次に述べる実験では目標の姿勢をとりやすくなる効果について検証する。



### 3.1.5 実験 2 : 姿勢再現におけるカチカチ感提示の効果検証

本実験では、被験者に負荷（疲労）がない条件下での姿勢再現課題を課すことでカチカチ感提示による目標の姿勢をとりやすくなる効果について検証する。

#### 3.1.5.1 セットアップ

図 3-6 に実験セットアップの模式図を示す。本実験では前実験と同様に、カチカチ感提示装置と同装置からばねと球を取り除いたカチカチ感を提示しない装置の 2 つを用い 2 条件（カチカチ感提示あり，カチカチ感提示なし）を設定した。被験者は左腕に装置を装着した。また，前実験と同様の光学式モーションキャプチャシステムを用い，被験者の左手首に装着したマーカの位置をカメラ 3 台で計測した。机の上には上腕固定台，分度器および 0 度確認用の固定台を設置した。

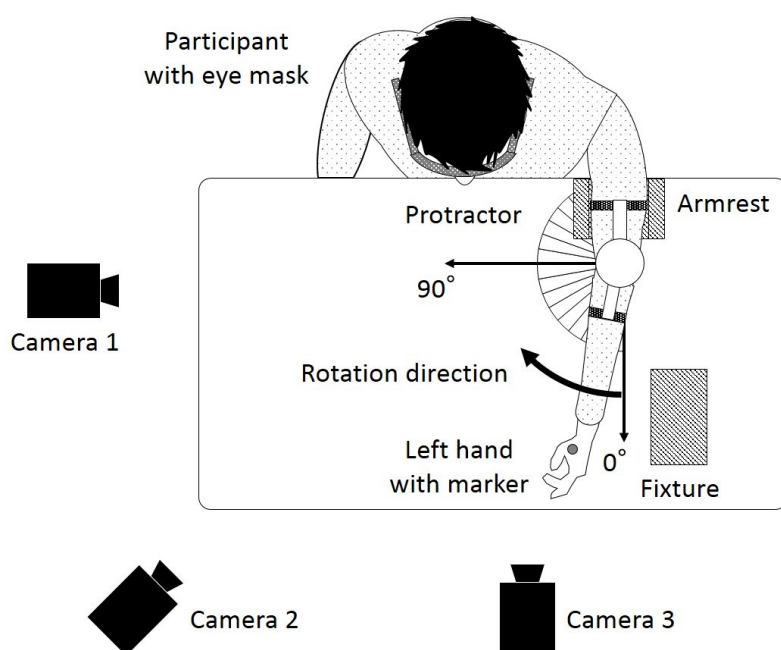


図 3-6 セットアップ

#### 3.1.5.2 実験手続き

まず被験者は机の前に座った状態で上腕固定台に左上腕を固定した。この時実験者は被験者の肘の位置に分度器の中心を移動させた。0度確認用の固定台は，被験者が左肘を完全に伸展させた状態で被験者の左前腕に接触するように設置した。その後，実験者は被験者にアイマスクを装着した。

実験者は被験者に左腕の力を完全に抜くように指示した。実験者は片手で被験者の前腕を把持し，他方の手を被験者の上腕に添え，教示角度まで肘を屈曲させた。その後，0度となる位置まで伸展させた。肘の屈曲および伸展にかかる時間は約3秒とし，伸展させてから約10秒間静止させた。次に，被験者は左前腕を動かし，教示された角度を再現するように肘を屈伸し，元に戻した。この教示-再現を1試行とし，被験者一人あたり16試行（カチカチ感提示2条件（あり，なし）×教示角度4条件（70，80，90，100度）×繰り返し2試行）行った。教示角度はランダムに提示され，被験者は教示角

度については知らされなかった。本実験には4名（全員男性；21 から 25 歳）の被験者が参加した。

### 3.1.5.3 実験結果・考察

図 3-7 に被験者 1 名のカチカチ感提示なし，教示角度 70 度，2 試行目の教示および再現時の軌跡を示す。実験結果を分析するために，再現軌跡の最大到達点と教示軌跡の最大到達点の 2 点間の符号付き距離を算出した。なお，図 3-7 では符号付き距離は-2.17cm であった。

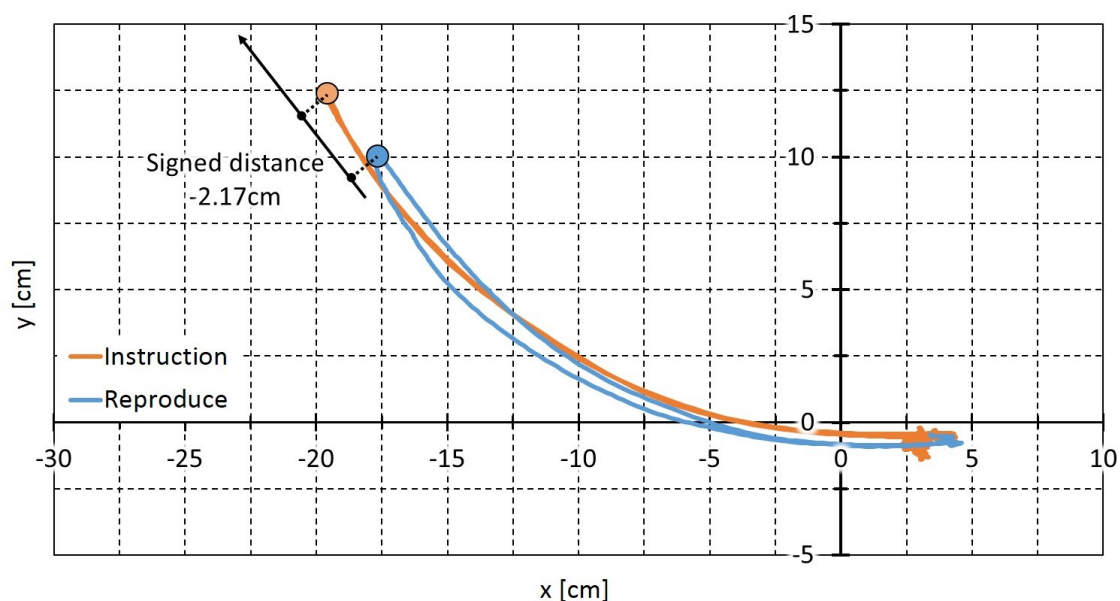


図 3-7 計測結果の一例：カチカチ感提示なし，目標角度 70 度，2 試行目。

符号付き距離に対し，3 要因（試行回数 2 条件×目標角度 4 条件×カチカチ感提示 2 条件）の被験者内分散分析を行った。その結果，カチカチ感提示要因の主効果において有意傾向が見られた ( $F(1,3)=7.04$ ,  $p<0.1$ )。また，試行回数要因とカチカチ感提示要因の相互効果において有意差が認められた ( $F(3,9)=106.3$ ,  $p<0.01$ )。一方で他の主効果および相互効果において有意差は認められなかった。本分析結果を考慮して，試行回数 2 条件およびカチカチ感提示 2 条件における符号付き距離の平均値および標準偏差を図 3-8 に示す。試行回数要因とカチカチ感提示要因の相互効果に対して Bonferroni 法による多重比較を行った。その結果，2 試行目におけるカチカチ感提示条件間 ( $F(1,3)=30.3$ ,  $p<0.05$ ) およびカチカチ感提示なし条件における試行間 ( $F(1,3)=16.4$ ,  $p<0.05$ ) において有意差が認められた。

本分析結果より次の 3 点が明らかとなった。一点目は，1 試行目における教示姿勢の再現に関して，カチカチ感提示は影響を及ぼさないことである。これはカチカチ感を提示しない状況における触覚手がかりだけでも被験者は教示された姿勢を再現できることを示唆する。つまり本課題は簡単すぎたため，触覚手がかりのみでは姿勢再現が困難であるといった状況をつくりだせなかった。すなわち，本実験目的であるカチカチ感提

示による目標の姿勢をとりやすくなる効果を本結果によって結論づけるには困難である。

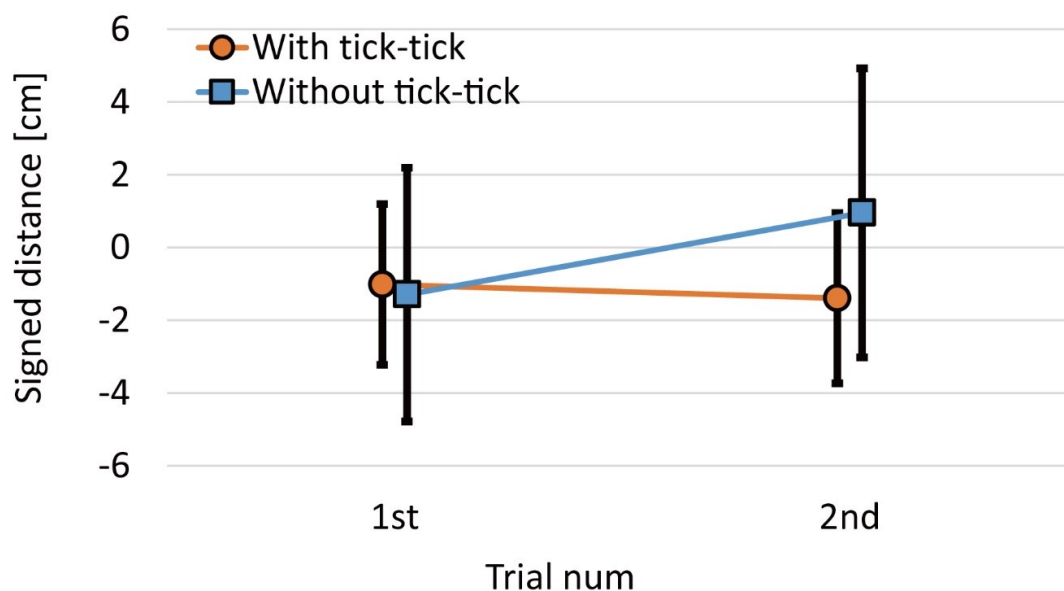


図 3-8 実験 2 結果：

試行回数 2 条件およびカチカチ感提示 2 条件における符号付き距離の平均値。

エラーバーは標準偏差を示す。

二点目は、2 試行目のカチカチ感提示なし条件に関して、被験者は 1 試行目よりも肘を曲げていたことである。これはカチカチ感提示なしの条件下では 1 試行目と同様の姿勢を維持できなかったことを示唆する。一方で図 3-8 より、肘をより曲げたことで目標値（教示）により近づいたといった見方もできる。これを結論づけるには試行数を増やした再実験が必要である。試行数が増えるごとに被験者がさらに肘を曲げる傾向が見られれば、本節冒頭でも述べたとおり触覚手がかりのみでの身体姿勢の制御が困難であることを示唆する。一方で、より目標値に近づく、あるいは屈伸量に変化が見られなければ、本来の触覚手がかりのみでも再現が可能であることを示唆する。

三点目は、カチカチ感提示あり条件において、1 試行目と 2 試行目では同様の姿勢をとることである。これは、カチカチ感提示なしでは同様の姿勢を維持できなかったことを考慮すると、カチカチ感提示には同様の姿勢を維持させる効果があるといえる。これは同じ姿勢をとり続けることが望まれるマスゲームやダンス等の教示あるいは実演中の補助としてカチカチ感提示が応用できる可能性を示したといえる。

### 3.1.6 展示

実験 1 終了後、カチカチ感提示ありの腕立て伏せは通常の腕立て伏せより楽しいという回答が得られた。このように被験者の多くは、実験後カチカチ感提示装置に興味をもち、本装置を装着した状態で野球の素振りや投球動作、パンチといった様々な動作を自発的に行った。これはカチカチ感提示が心地よく感じられたため、被験者はカチカチ感を感じるために自発的に運動を行ったと考えられる。

カチカチ感提示装置をこれまでに情報処理学会エンタテインメントコンピューティング 2011（日本科学未来館，2011年10月7-9日）および ACM Augmented Human 2012（フランス，2012年3月8-9日）にて実演展示した。体験者の反応は「腕の角度がわかりやすい」「やみつきになるおもしろい感覚」「ヒーローの変身アイテムとして全身に装着して使いたい」等，極めて良好であり，本節で掲げた以外の使い方に関するコメントがあった。以上より，カチカチ感提示は運動に対するモチベーションを向上する効果および運動を修飾する効果があるといえる。

運動に対するモチベーションを向上する効果は積極的な報酬として筋力トレーニング等に応用できると考えられる。4.2節で述べる歯磨きに関する問題と同様に筋力トレーニングはその効果が現れるまでに時間がかかるため，訓練の最中はその効果を実感できず，怠けて身体が衰えることで初めて効果を実感することがしばしばある。これに対して，カチカチ感提示によるモチベーション向上効果が解決策の一つになると考えられる。

また，運動を修飾する効果は Microsoft の Kinect 等を用いた身体運動を入力とするビデオゲーム等のフィードバックに応用できると考えられる。現在の身体運動を入力とするビデオゲームにおいて，そのフィードバックは振動提示あるいは視覚提示のみに留まっている。これに対し，本装置を用いることで運動したことがより強調されゲームへの没入感が向上する。本装置は現在，カチカチ感を提示する周期や肘の可動閾が小さいこと，装着時の装置のずれ等，触覚提示の階調性や安定性に制約がある。そのため今後装置の改良が必要である。一方で，これまでの実験で述べたような運動の精密な再現よりも，ここで述べたような高い精度が必要とされないビデオゲーム等へのエンタテインメント応用の方が適している場合もあると考えられる。

### 3.1.7 まとめ

本研究では肘屈伸動作に応じてロータリスイッチ的な周期的な触覚提示を行うことで触覚的運動知覚の拡張を試みた。ロータリスイッチに採用されているカムスイッチ機構を参考にカチカチ感提示装置を設計・開発した。実験1では，腕立て伏せ時にカチカチ感を提示することで疲労した際にも所望の型を崩すことなく肘屈伸が行えるという仮説の基，腕立て伏せ課題を行った。実験結果は直接的に仮説を支持するものではなかった一方で，カチカチ感提示によって屈伸量が増加する傾向が観察された。実験2では肘に負荷がかからない状況での姿勢教示に対してカチカチ感を提示することで教示姿勢と同様の姿勢が再現しやすくなるという仮説の基，教示姿勢再現課題を行った。実験結果から，カチカチ感提示によって同様の姿勢がとりやすくなる効果が観察された。カチカチ感提示装置の実演展示等を通じて，カチカチ感提示装置を装着したユーザは自発的に様々な動作をとり，カチカチ感に心地よさを覚えた等の報告をした。これは，カチカチ感提示は運動に対するモチベーションを向上させる効果があることを示唆する。以上より，カチカチ感提示によって触覚的運動知覚が拡張できることが示された。

本研究は，視覚的運動知覚が行えない状況下で触覚提示によって触覚的運動知覚を拡張することを目的に行われた。これは視覚的運動知覚を新たな触覚提示により代替を試みたといえる。視覚的運動知覚は直接あるいは鏡などを介して自身の姿を見ることで行われる。1.1.1項や3.1.1項でも述べたとおり，視覚は触覚よりも空間的解像度に優れて

いることから、身体姿勢の制御において信頼され優位に扱われる。2つの実験結果は、カチカチ感提示が完全に視覚的運動知覚を代替できるものと結論づけるものでないが、視覚が使えない状況下での運動知覚を拡張したといえる。特に、モチベーション向上効果に関して、実験による定量的な評価は行っていないが、運動がカチカチ感提示によって強調されることを示唆している。これは、通常連続的な運動知覚がカチカチ感提示によって離散化されることでユーザに身体が動いた、あるいはユーザが身体を動かしたことを明確に提示したためと考えられる。無論、我々の運動知覚が離散化されることは通常ありえない。しかし、カチカチ感提示が運動知覚を強調できたことは、運動知覚の拡張において実感性を伴っていたためと考えられる。

また、本研究の今後の展望として、カチカチ感提示の周期等を動的に変えることで身体姿勢・運動量の錯誤効果の検証が挙げられる。ユーザがカチカチ感提示装置を長期にわたり使用することで、肘の角度をカチカチ感のみを頼りに行うようになることを期待する。これにより、カチカチ感の提示周期を操作することでユーザに肘屈伸量を錯誤するようになると考えられる。これが実現できれば、視覚および従来触覚的運動知覚を完全にカチカチ感提示で代替したといえる。

以上より、本研究は誇張表現のうち代替モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発であったといえる。また、本手法は視覚的運動知覚および従来触覚的運動知覚を完全に代替するものではないが、実感性の伴った運動知覚拡張ができた結論づけられる。

## 3.2 Visual Vibration: 叩き動作に応じた視覚的材質感提示

本節では、視覚から振動感覚を提示する手法 Visual Vibration の設計・開発について述べる。本手法では、現実では聴覚・触覚で感じられる高周波数振動を視覚で感じられるように変調して疑似触覚提示を行う。本手法のケーススタディとして物体を叩いた時に生じる振動に適用することで材質感提示を試みる。

### 3.2.1 研究背景

近年、任天堂の Wii リモコンを筆頭に、Microsoft の Kinect, Leap Motion の Leap Motion コントローラ等、様々な身体動作を入力とする入力インタフェースが普及している。これらのインタフェースは、ユーザの身体動作がコンピュータを介してモニタに表示し、ユーザがモニタに表示されたカーソルやアバタに自身の写像を投影しやすい環境を提供している。そのためユーザは直感的な HCI を体験できる。また、これらのインタフェースの大きな特徴として、ユーザにマーカを装着させたり、複数台のカメラを設置しなければならなかったりした従来の身体動作計測装置と比較して、非常に簡便かつ安価に計測が可能である点が挙げられる。

これに対する触覚提示として、Wii リモコンではコントローラ内部の振動子より振動刺激を提示する。また GravityGrabber[123]のようなウェアラブルな触覚提示も開発されており、Kinect と組み合わせることで指先に圧覚やせん断力等の皮膚感覚提示を行うシステムも開発されている[36]。しかし、マーカの装着が必要なくなった身体動作入力環境において、触覚提示装置の装着は煩わしさが伴うことがある。例えば、ネクストシステムの Kinesys のように、Kinect によって近くをとおりかかったユーザの動きを映像に反映させるデジタルサイネージにおいて、ユーザ一人一人に触覚提示装置を装着させることは実用的ではない。

これに対し、触覚の可視化 (Haptic Visualization: HV) により視覚的に疑似触覚提示する手法がある。HV の一例として、pseudo-haptics<sup>2</sup>[92]が挙げられる。詳細については次項で述べるが、興味深いこととして、pseudo-haptics はユーザの筋電反応が生じるという報告があり、HV であるにも関わらず生理的に触覚が生起することが確認されている[166]。しかし、実際に生じる触覚と比較して、HV を用いた触覚提示は高い周波数帯域、つまり振動感覚のような皮膚感覚提示において限界がある。なぜなら視覚的に触覚で感じられる振動周波数（～約 500Hz ; 2.2 節参照および[76]）を再現しようとするには通常のモニタのリフレッシュレート（60~120Hz）では不十分であり、またヒトの視覚特性上 50Hz 以上の振動の知覚が難しいためである[37][67]。

そこで、本研究は HV によって振動感覚を提示する手法の実現することを目的とする。本節ではまず、pseudo-haptics を含む触覚の HV の先行研究について述べる。次に Okamura らの物理現象をヒトの感覚特性に基づいて変調するという reality-based モデル[134]について考察する。そして、物体を叩いたときに生じる振動を手がかりとした材質

---

<sup>2</sup> 疑似触覚は聴覚等によっても生起するが（4.2.2 項参照）、本項では特に断りがない限り視覚によって生起する疑似力覚現象を pseudo-haptics と表記する。

感知覚をケーススタディに Visual Vibration の実装について述べ、被験者実験より Visual Vibration による材質感提示について評価する。最後に本手法を利用したアプリケーションについて述べる。

## 3.2.2 先行研究

### 3.2.2.1 視覚が触覚に与える影響

視覚と触覚のクロスモーダル研究において、視覚がしばしば空間知覚の優位性をもつことが知られている。例えば Rock と Victor は、被験者に正方形のタイルを触れさせている際に同時にレンズで視覚的に長方形に変形させたタイルの像を見せるという状況でタイルの形状を回答させる実験を行い、形状知覚において視覚が優位に寄与することを示した[145]。このような視覚が優位に働く現象は *visual capture* と呼ばれ、長さ[33]、位置[136]、バネの硬さ[82][158]、大きさと重さ[130]といった空間知覚において確認されている。一方で、*visual capture* は常に生じないことも報告されている。例えば物体表面の粗さ感知覚において、表面の凹凸が視覚的に見えにくいほど小さい状況では視覚が知覚に影響を及ぼすものの触覚が優位に働くことが報告されている[97]。これらに対し、*visual capture* は視覚的な手がかりが触覚的な手がかりよりも信頼性が高い時に生じることが指摘されており[33][97]、また知覚は視覚、触覚それぞれの手がかりが統合して行われることが被験者実験および数理モデルを利用した解析によって示されている[32][88]。

明示的な触刺激がない状況においても、視覚刺激のみによって触覚が生起することが知られている。Biocca らは VR システム内のユーザに生じる視覚-触覚の錯覚現象の生起機序を探索するための実験を行った[15]。彼らの実験では、被験者は HMD を装着し、VR 空間内に存在するバーチャルな物体をある場所から取り除くという課題を行い、その後、体験に関するアンケートおよび実験中に物理的な力を感じたかを回答した。ただし、この時の VR システムには物理的な力を提示する装置は含まれていなかった。被験者の回答を解析したところ、VR 空間に没入しやすいと判断される被験者ほど実験中に提示されていないはずの力を感じやすいという結果が得られた。Biocca らは統計学的手法より、この錯覚の生起は空間的、感覚的存在感（VR 空間に入り込んだ感覚、VR 空間が実世界であるかのように思える感覚）に起因していると主張している。

### 3.2.2.2 Pseudo-Haptics

Pseudo-haptics は視覚によって摩擦感や重さ感等の力覚が誘発される錯覚現象であり、例えば PC マウスの使用中にモニタ上のカーソルの移動速度がマウスの移動速度と比較して急に遅くなると、マウスが重たくなったかのように感じるという経験が挙げられる[92]。

Lécuyer らは本現象をマウスカーソル等のユーザの身体動作がモニタ上に投影された像の C/D (Control/Display) 比を操作することで pseudo-haptics を実装した[96]。C/D 比は、マウスカーソルを例にすると、マウスもしくは手 (Control) の速度に対するモニタ上のカーソル (Display) の速度の比である。C/D 比が急激に変化すると、触覚と視覚の位置関係の矛盾が生じ、視覚が優位に働く結果として C/D 比の上昇は重さ感や摩擦感の増大を、C/D 比の下降はその逆を引き起こす。これを利用して硬さ感[96]、トルク感

[137], 凹凸感[93]そして重さ感[30]が再現され, 心理物理実験により生起される感覚が物理量で評価されている. これらの先行研究が示すように, pseudo-haptics によって再現される知覚は様々あり, 文脈に依存することが指摘されている[92].

### 3.2.2.3 その他の触覚の可視化手法

C/D 比の操作に加え, 様々な HV 手法が開発されている. マウスカーソル等のサイズや軌跡を操作することで疑似触覚提示する手法が開発されている. サイズを操作する手法では, 例えば, モニタ平面上において奥行きを表現するために遠近法を利用してマウスカーソルのサイズを操作する手法がある[94][178]. また軌跡を操作する手法では, マウスカーソルをマウス操作に関係なく常に一定の方向に動かし続けることで引力もしくは反力感を提示したり[142], 画面上に表示されたユーザのアバタの手指の軌跡あるいは触れた対象の形状を操作することでユーザが触れている実物体とは異なる形状, 硬さに錯覚させたりする手法[6][58]が開発されている.

Watanabe らは振動を提示する HV 手法を開発した[178][179]. 例えばマウスカーソルの移動中に進行方向とは異なる方向に微少に振動させることでスクリーン上に粗さ感や風の抵抗感を表現し, その振幅によって粗さや抵抗の大きさを表現した. このように変位の方向を改変し振幅を増幅して提示することで HV による振動提示が行われている. 本節では次項で述べるように, この変位の操作に加え, 周波数の操作を行うことで HV による振動提示を拡張する.

これらの HV 手法は必ずしも筋電反応等の生理現象を伴わないが, ユーザにバーチャル世界で生じる触覚的な手がかりを提示する. 本節ではこのような HV 手法によって特に皮膚感覚的な高周波振動を提示する手法の実現する. 本節ではケーススタディとして叩き動作に対する振動提示による材質感提示を試みる.

### 3.2.2.4 物体を叩いた時の材質感提示と Reality-Based モデル

固い物体の表面を手指あるいは道具を介して叩いた時, ヒトは視聴覚に頼らずとも触覚手がかりによって触れた物体の材質を識別することができる. この時の触覚手がかりとして物体に触れた瞬間に生じる振動等による皮膚感覚と物体表面から返される力による固有受容感覚が挙げられる. これまでに, 皮膚感覚と固有受容感覚を同時に提示してバーチャル物体の形状と材質感を提示する手法が開発されている. Wellman と Howe はボイスコイルを搭載した力提示装置を実装し, 皮膚感覚と固有受容感覚を独立のアクチュエータから提示した[181]. 彼らは皮膚感覚提示に式(1)および図 3-9 に示す減衰正弦波モデルを採用し, 固い物体に触れた時から時間  $t$  (図 3-9x 軸) が経過した振動加速度  $Q(t)$  (図 3-9y 軸) を再現した.

$$Q(t) = A(v) \sin(2\pi ft) \exp(-Bt) \quad (1)$$

ここで,  $A$  は初期振幅係数,  $v$  は接触速度,  $B$  は減衰係数,  $f$  は振動周波数である.  $A$ ,  $B$ ,  $f$  の値は材質によって定まるパラメータである.

Okamura らは皮膚感覚と固有受容感覚を単一の力提示装置のみで提示する手法を開発した[134]. この時, 力提示装置が提示できる振動周波数帯域が所望の振動周波数帯域に対して不十分であるという問題に対し, Okamura らは一連の実験を通じて減衰正弦波



モデルのパラメータを再設計，モデル化する Reality-Based モデルと呼ばれる手法を構築した。

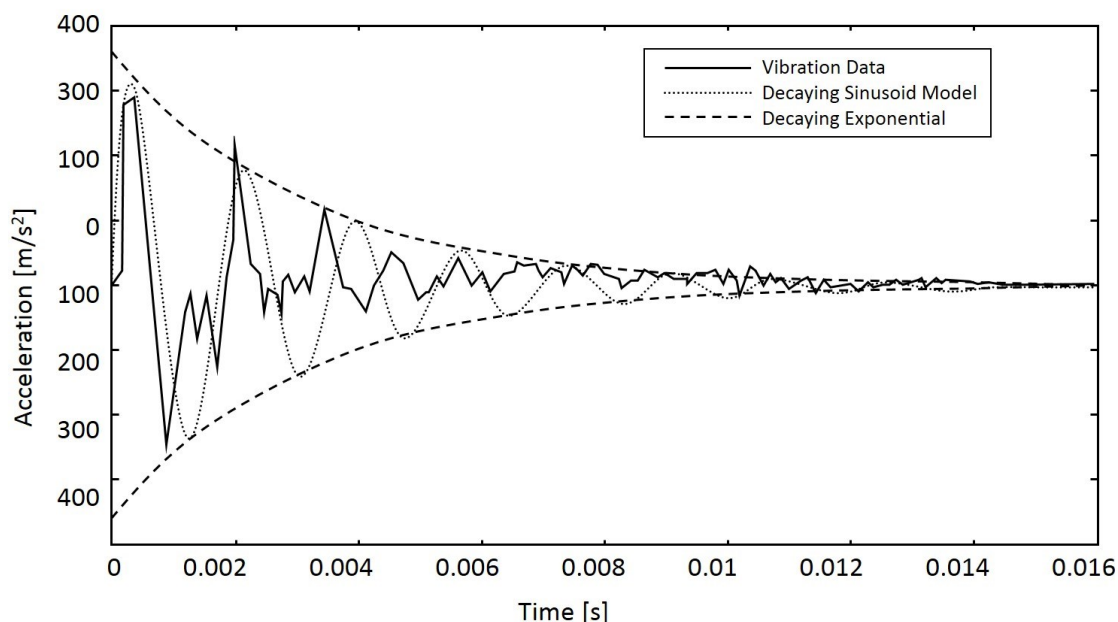


図 3-9 減衰正弦波モデル ([134]を基に改変)

図 3-10 に物体を叩いた時に生じる振動の周波数，振動提示に用いられる周波数，および皮膚感覚と視覚で受容できる振動周波数を示す．物体を叩いた時に生じる振動（高周波成分）と反力（低周波成分）を同時に提示することは，現存の力提示装置では周波数帯域に制限があるため困難である．この問題を解決するために，Wellman と Howe は力提示装置にボイスコイルを搭載することで，実際に物体を叩いた時に生じる数十から数千 Hz の減衰正弦波振動を反力とともに提示するシステムを開発した[181]（図 3-10 の 1-2 段目）．

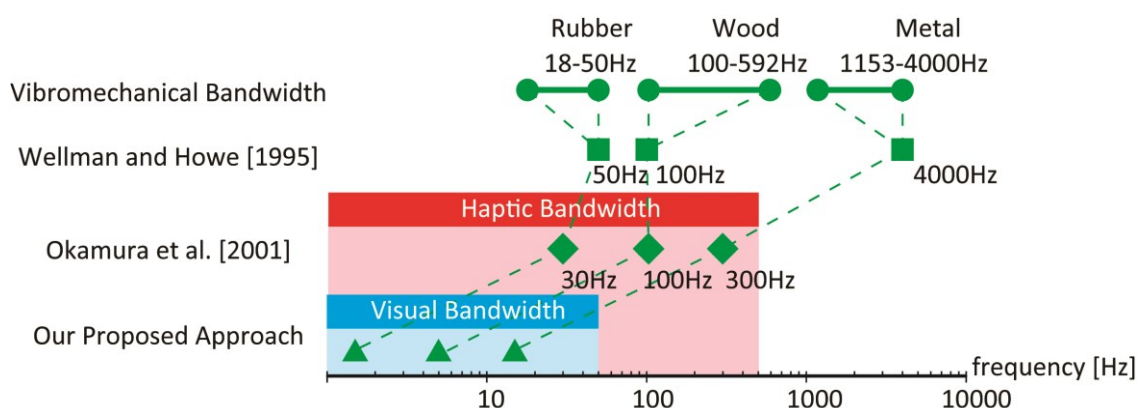


図 3-10 物体を叩いた時に生じる振動の周波数，振動提示に用いられる周波数 [181][134]，および皮膚感覚[76]と視覚で受容できる振動周波数[37][67]

Okamura らは力提示装置のみで力と振動を提示するために，reality-based モデルという新たな振動モデルを構築した[134]．Reality-based モデルは物体（ゴム，木，金属）を

叩いた時に実際に生じる数十から数千 Hz の周波数帯域をヒトが触覚的に感じることでできる数十から数百 Hz の周波数帯域 (2.2 節参照) に変調するものである (図 3-10 の 2-3 段目). ゴム, 木, 金属はそれぞれの周波数は 30, 100, 300Hz に設定され主に FA-I, FA-I および FA-II, FA-II で受容される周波数に合わせられている. したがって, Okamura らの振動モデルは実際に生じる振動とは明らかに異なるものである一方で, 周波数の大小関係は現実に基づいているため実感性が伴っており, かつ生理学的に弁別しやすい周波数帯域が用いられている.

Hashimoto と Kajimoto も触覚的なスローモーション効果によって同様の触覚提示を行った[52]. 彼らはナットやゴム球等がプラスチック板に衝突する際に生じる振動を記録し, ボイスコイルより再生速度を落としてその振動を提示した. そして被験者実験により, 被験者に提示された振動から物体を識別する課題を与えた際の識別率と再生速度の関係を調査した. その結果, 通常再生速度で振動提示する条件よりも再生速度を 10 分の 1 ほどに落として提示する条件において高い識別率が示された. この理由として, Hashimoto らはスローモーション効果によって提示された振動の周波数帯域が触覚で感じられる周波数帯域に重なったためと考察している. これも reality-based モデルと同様に, 現実とは異なる振動であるにも関わらず, より分かりやすい触覚提示が実現されたと見なすことができる.

これらの先行研究が主に周波数変調に着目したのに対し, Gleeson と Johnson は cartoon-inspired モデルというアニメーションで用いられる誇張表現を触刺激の振幅や継続時間等, 広く触覚レンダリングに応用した[43]. 彼らは, cartoon-inspired モデルは非現実的ではあるが表現の幅を広げ, インタラクションの質を向上させることを主張している.

### 3.2.3 Visual Vibration

本研究では, 通常聴覚, 触覚で知覚される振動の振幅および周波数を変調することで視覚によって代替する手法, Visual Vibration を設計・開発する. 本節ではそのケーススタディとして物体を叩いた時に生じる振動の視覚的に提示する手法について述べる.

本項では二次元モニタ上に表示されたバーチャルな物体をマウスカーソル叩いた際の材質感提示を想定する. 本システムはマウス, モニタそして PC から構成される. ここでは簡単のため, 後に述べる実験 1 のセットアップ (図 3-11) を元に説明する. 図に示すようにモニタ上にバーチャルな物体とマウスカーソルが表示されている. まず, モニタ上にバーチャルな物体の位置を定義, 描画する. 次にユーザのマウス操作に応じてモニタ上にマウスカーソルの位置を決定, 描画する. そしてマウスカーソルがバーチャルな物体に接した時, バーチャルな物体とマウスカーソルが衝突したと判定し, その時の衝突位置 (接触点) と衝突速度  $v$  を計測する. その後, 式(1)の減衰正弦波モデルにしたがってマウスカーソルを振動させる. ただし本アルゴリズムでは加速度  $Q(t)$  を振動振幅とし, 振動を視覚的に提示するために  $A$  の値を増幅し,  $B$  および  $f$  の値は減衰させる.

マウスカーソルの振動の挙動として 2 つの振動様式が考えられる. 一方はマウスカーソルが衝突位置を中心にバーチャルな物体内部に侵入しながら振動するものである (以後 B-In と記す: 図 3-12 上). したがって衝突判定後, マウスカーソルは衝突速度  $v$  および初期振幅係数  $A$  に応じてバーチャルな物体に侵入する. 他方はマウスカーソルが

バーチャルな物体の表面で跳ね返りながら振動するというものである（以後 B-On と記す：図 3-12 下）．したがって式(1)は次式のようになり，B-On では B-In の 2 倍の振動周波数が観察される．

$$Q(t) = -|A(v) \sin(2\pi ft) \exp(-Bt)| \quad (2)$$

最後に本アルゴリズムは振動周波数  $f$  と減衰係数  $B$  にしたがってマウスカーソルを減衰振動させる．したがって，本モデルでは材質感提示のための振動パラメータ（以後材質感パラメータと記す）として初期振幅  $A$ ，減衰係数  $B$ ，振動周波数  $f$ ，そして 2 つの振動様式で減衰正弦波振動を視覚的に提示する．なお，他の考えられる実装としてバーチャル物体を振動させる方法やカーソルを変形させる等が考えられるが，本節では簡便に実装でき，他のアプリケーションでも簡単に利用できるカーソルの軌跡操作で Visual Vibration を実装した．



図 3-11 実験 1 のスクリーンショット

### 3.2.4 実験 1 : Visual Vibration による材質感提示検証

実装した Visual Vibration によって材質感提示が可能であるかを検証するために実験を行った．本実験では被験者が Visual Vibration を手がかりにバーチャルな物体の材質を識別できるかを検証する．さらに Visual Vibration によって提示される材質感がどれくらいその材質らしいかを評価する．

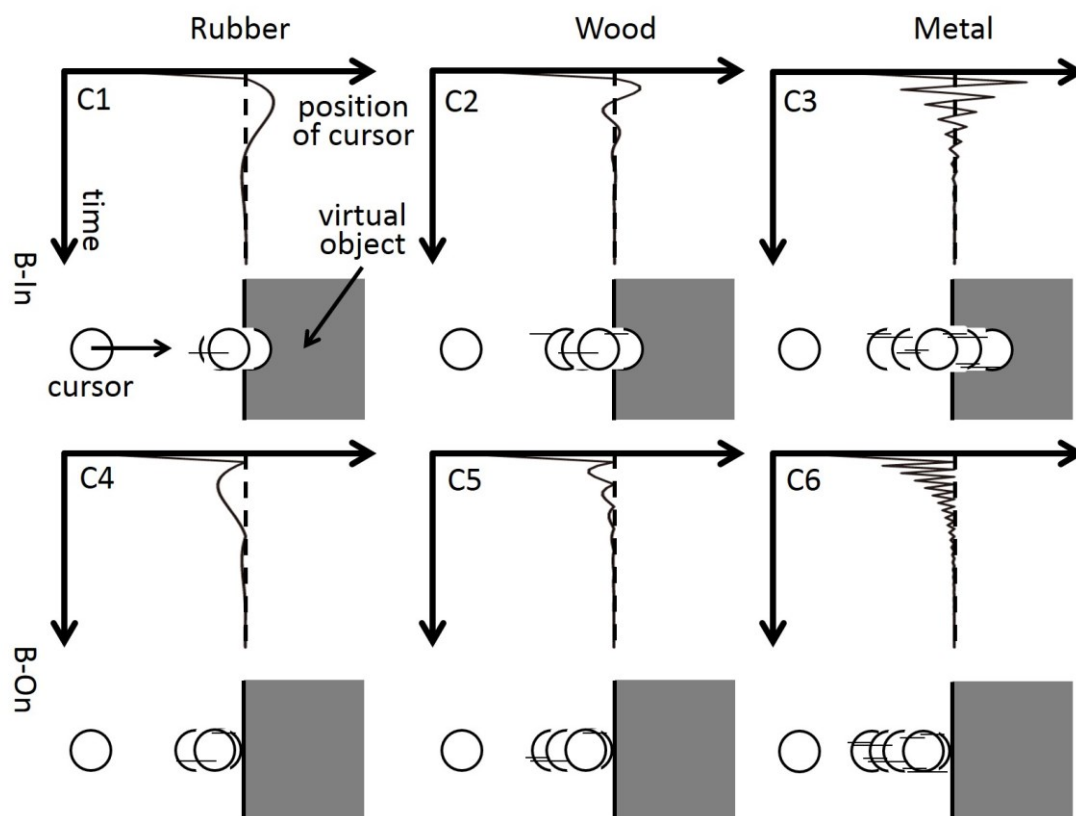


図 3-12 2つの振動様式と3つの材質：

x 軸はカーソルの軌跡，y 軸は時間を示す。

上) B-Off : マウスカーソルがバーチャルな物体に侵入しながら振動，

下) B-On : マウスカーソルがバーチャルな物体の表面で跳ね返りながら振動。

左からゴム，木，金属を示す。

### 3.2.4.1 セットアップ

本実験で使用したシステムは PC，モニター (20inch 液晶ディスプレイ，解像度：800×600，ピクセルピッチ：0.510mm，リフレッシュレート：60Hz)，有線光学式マウスおよびキーボードより構成された。図 3-11 に実験の間被験者に提示した PC モニターのスクリーンショットを示す。マウスカーソルは半径 10pixel (5.1mm) の緑色の円で表示した。またバーチャルな物体を 200×200pixel (102mm×102mm) の白色の正方形で表示した。両者とも黒い背景の上に描画された。緑色のマウスカーソルは PC マウスの操作により水平方向のみに動くようにした。

本実験では Okamura らの論文[134]を参考に，3つの材質 (ゴム，木，金属) を再現した。前項で述べたように振動パラメータを変調するために，各材質の3つ材質感パラメータ ( $A$ ， $B$ ， $f$ ) を改変した。 $A$  と  $B$  に関しては，被験者が振動の違いが視覚的に分かるように， $f$  に関しては最も高い材質 (金属) で 15Hz とした。15Hz は実験で使用したモニターが安定して提示できる最大の周波数であった。さらに 3 組の材質の材質感パラメ

ータに対し、2つの振動様式を適用した。したがって表 3-1 に示すように、被験者に提示される振動パラメータは C1 から C6 の 6 種類であった。

表 3-1 6 種類の振動パラメータ：  
3つの材質の材質感パラメータ×2つの振動様式

No.	Material	A [s]	B [s <sup>-1</sup> ]	f [Hz]	Vibrating
C1	Rubber	0.015	6.0	1.5	B-In
C2	Wood	0.009	8.0	5.0	B-In
C3	Metal	0.020	9.0	15.0	B-In
C4	Rubber	0.015	6.0	1.5	B-On
C5	Wood	0.009	8.0	5.0	B-On
C6	Metal	0.020	9.0	15.0	B-On

### 3.2.4.2 実験手続き

本実験には 12 名（男性 10 名，女性 2 名；22 から 29 歳；全員右利き）が参加した。被験者は G1 か G2 のいずれかに、それぞれ等しい人数になるように振り分けられた。本実験は、1) 材質感識別課題と 2) 材質感の主観評価の 2 つのセッションから構成された。被験者は材質感識別課題を行った後、材質感の主観評価を行い、最後に自由記述を含むアンケートに回答した。

#### 材質感識別課題

被験者はまずモニタの前に着席し、利き手をマウスの上に置いた。試行開始前に、被験者はマウスを机に緑色のテープで示された位置にマウスを置くように指示された。図 3-11 に示すように、カーソルはバーチャル物体から 400pixel 離れた位置に表示されていた。試行を開始するために、被験者はキーボードのスペースバーを押すように指示された。試行開始後は 5 秒間、被験者はバーチャルな物体をマウスカーソルで叩いて材質を識別するように指示された。試行後、カーソルおよびバーチャルな物体は非表示となり、3 つの選択肢（ゴム、木、金属）が表示され、被験者は試行中に感じた材質をキーボードより選択、回答した。選択、回答の時間に制限はなかった。

G1 の被験者は B-In 条件で本試行を行った後に B-On 条件で本試行を行い、G2 の被験者は逆の順で行った。被験者は B-In、B-On それぞれの条件で 6 回の練習試行（3 条件×2 試行）を行った後に、24 回の本試行（3 条件×8 試行）を行った。したがって被験者は一人あたり 60 回の試行（(6 回の練習試行+24 回の本試行)×振動様式 2 条件）を行った。それぞれの試行では 3 組の振動パラメータはランダムに提示され、被験者は実験終了まで正答、不正答に関しては知らされなかった。

#### 材質感の主観評価

6 つの振動パラメータとそれぞれの評価値が図 3-11 の上部に白色の文字で表示され、選択中のパラメータと評価値は赤色で表示された。被験者はバーチャルな物体がゴムでできていると想像してカーソルでバーチャルな物体を叩くように指示された。被験者は

キーボードを使って、他の振動パラメータに自由に切り替えることができた。被験者は6つの振動パラメータに対してゴムらしさを7段階リッカートスケール（1：全くゴムらしくない～7：本当にゴムのようだ）で評価した。本評価において時間に制限はなかった。6つの振動パラメータに対するゴムらしさの評価の終了後、被験者はバーチャルな物体が他の材質（木、金属）でできていると想像し、6つの振動パラメータに対して同様の評価を行った。

### アンケート

被験者に実験中どのような戦術で回答・評価したか、Visual Vibration が本物らしく感じられたか等を自由記述形式で回答させた。

#### 3.2.4.3 実験結果・考察

本実験結果では材質感パラメータの材質と被験者が回答した材質が一致した時を正答とした。また、材質感識別課題に関しては本試行の実験結果のみを分析に用いた。

#### 材質感識別課題

材質感パラメータと振動様式に対す正答率を図 3-13 に示す。本結果に対してカイ二乗適合度検定を行ったところ、全体の正答率（62.2%）はチャンスレベル（33.3%）を有意に上回ることが示された（ $\chi^2(1)=215.3$ ,  $p<0.001$ ）。したがって、被験者は Visual Vibration を手がかりに正しく材質を識別できていたと考えられる。さらに詳細な分析を行うために、本実験結果に対してロジット分析を行った。分析にはまず次の加法モデルを適用した。

$$Correct \sim \alpha + \beta \times Mat + \gamma \times Vib + \delta \times Grp + r \quad (3)$$

ここで *Correct* は正答率であり、*Mat*（材質感パラメータ条件：ゴム、木、金属）、*Vib*（振動様式条件：B-In, B-On）、*Grp*（グループ条件：G1, G2）は固有効果であり、*r* はランダム効果（被験者）である。分析の結果、*Grp* に有意差が見られなかった（ $p=0.711$ ）一方で、他の条件では有意差が認められた（ $p<0.05$ ）。本結果を踏まえて、式(3)より *Grp* を除外し、次の乗法モデルを適用した。

$$Correct \sim \alpha + \beta \times Mat + \gamma \times Vib + \delta \times Mat:Vib + r \quad (4)$$

ただし、*Mat:Vib* は材質感パラメータ条件と振動様式条件の相互効果である。分析の結果、2つの固有効果と同様に相互効果に有意差が認められた（いずれも  $p<0.01$ ）。したがって、本実験で設計した Visual Vibration の2つの振動パラメータが被験者の材質識別率に影響を及ぼしたことが示唆された。

#### 材質感の主観評価

材質感の主観評価の結果を表 3-2 に示す。各材質に対して Steel-Dwass 検定を行ったところ、B-On 条件が木の評価値（C4 および C5）および金属の評価値（C5 および C6）

を、B-In 条件がゴムの評価値 (C1 および C2) を上昇させていることが示された (いずれも  $p < 0.05$ ).

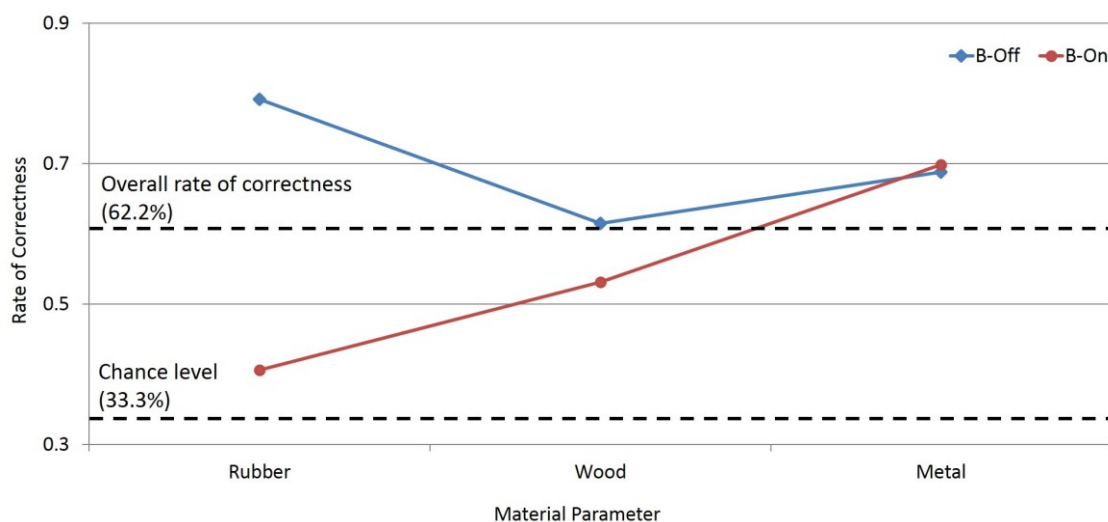


図 3-13 実験 1 の結果 (材質感識別課題) :  
材質感パラメータと振動様式に対する正答率

表 3-2 実験 1 の結果 (材質感の主観評価) :  
6 つの振動パラメータに対する評価値の中央値 (Me) および四分位範囲値 (IQR).  
黄色の塗り潰しは正答を表す.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Steel-Dwass Test
<b>Rubber</b>	4 (3.25)	4 (4.25)	1 (0)	3 (2)	2 (1.5)	1 (0)	C1, C2 > C3, C6; C4 > C3
<b>Wood</b>	1 (0)	1 (2.25)	1 (1.25)	6 (1)	5 (2)	1 (1.25)	C4 > C1, C2, C3, C6; C5 > C1, C3
<b>Metal</b>	1 (0)	1 (1)	4 (3.25)	1.5 (2.25)	3 (1)	6 (1)	C3 > C1; C5 > C1, C2; C6 > C1, C2, C4

#### アンケート

アンケートによると、振動周波数と初期振幅が主に識別時の手がかりとして使われていた。さらに、カーソルのバーチャルな物体への侵入がバーチャルな物体の変形や柔らかさを想起させると回答された。しかし、約半数の被験者が Visual Vibration が本物らしくないと回答した。自由記述の内容をさらに注意深く読むと、本物らしくないと回答し

た被験者を2つの群(1) 全く本物に思えない群, 2) 本物とは思えないが理解できる群) に分類できた。前者において, 被験者は Visual Vibration が意図するものが全く分からなかったと回答した。後者において, 被験者は Visual Vibration が本物とは思えなかったが, 現実の要素を提示している印象を受けたと回答した。この2群の違いに対し, 被験者の触覚やアニメーションの表現方法等の知識背景が関係していることが考えられる。本仮説に関しては次に述べる実験で検証する。

材質感識別課題と材質感の主観評価の結果をもとに, 次に述べる実験2ではゴム, 木, 金属の振動パラメータにそれぞれ C1, C5, C6 を採用する。

### 3.2.5 実験2 : Visual Vibration による材質感識別再検証

本実験では, 前実験で得られた振動パラメータを用い Visual Vibration によってバーチャルな物体の材質を識別できるかを検証する。さらに被験者の背景知識が及ぼす影響について調査する。

#### 3.2.5.1 セットアップ

本実験で使用したシステムは前実験と同様であったが, 次の2点を再設計した。一点目は図 3-16 に示すように3つのバーチャルな物体をモニタに表示したことであり, 二点目はマウスカーソルを二次元平面上に動かせるようにしたことである。

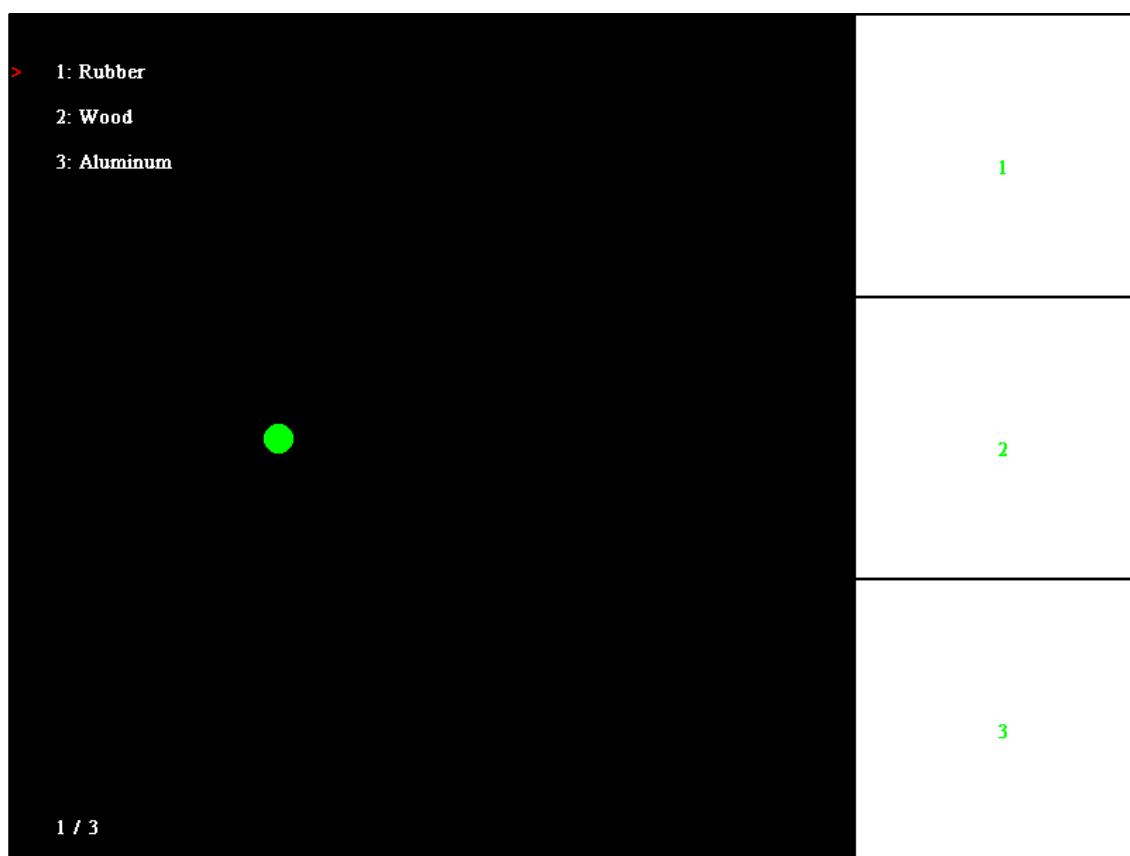


図 3-14 実験2のスクリーンショット



### 3.2.5.2 実験手続き

本実験には 14 名（男性 12 名，女性 2 名；20 から 25 歳；全員右利き；全員前実験には不参加）が参加した。8 名は Visual Vibration の趣旨について知らされておらず（初心者），他の 6 名は触覚および Visual Vibration の趣旨に関して知識を有するものであった（熟練者）。

前実験と同様に，被験者はまずモニタの前に着席し，利き手をマウスの上に置いた。3 つのバーチャルな物体の番号と材質の選択肢がモニタの右上に表示された。図 3-15 にゴム (C1)，木 (C5) および金属 (C6) の実際のマウスカーソルと表示されたマウスカーソルの軌跡の例を示す。3 つの振動パラメータはランダムに重複なく 3 つのバーチャルな物体に適用された。被験者はキーボードを使用して 3 つの選択肢（ゴム，木，金属）からそれぞれのバーチャルな物体の材質を回答した。なお，被験者には 3 つのバーチャルな物体は全て異なる材質であることが知らされていた。選択，回答の時間に制限はなく，被験者は自由に何度でもバーチャルな物体を叩くことができた。被験者は実験終了まで正答，不正答に関しては知らされなかった。

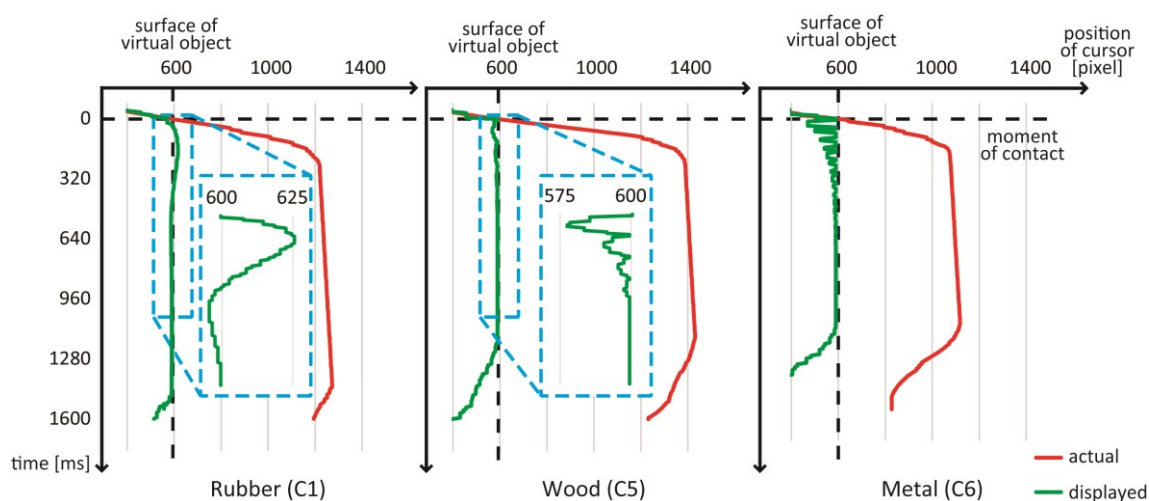


図 3-15 ゴム (C1)，木 (C5) および金属 (C6) の実際のマウスカーソルと表示されたマウスカーソルの軌跡の例

### 3.2.5.3 実験結果・考察

本実験の結果を表 3-3 に示す。正答率（図中黄色で示したセル）は全ての材質において 80%以上であった。ゴムの正答率が最も高かった（92.3%）一方で，木と金属が最も間違えて回答された。

2 つの被験者群を比較したところ，熟練者群では正答率が 100%であったのに対し，初心者群の正答率（66.7%）は有意に低かった（Fisher の正確確率検定， $p < 0.001$ ）。初心者群において，4 名の被験者の正答率が 100%であったのに対して，3 名の被験者の正答率が（33.3%もしくは 0%）であった。これらの結果は Visual Vibration は写実的な触覚提示手法ではなく，解釈が被験者の主観に依存することを示唆するものである。本実験においてはほとんどの初心者の被験者に設計した振動モデルによって意図した材質

らしさを感じさせることができた一方で、3名の被験者に関しては感じさせることができなかった。

表 3-3 実験 2 の結果

	Vibratory parameters		
	Rubber	Wood	Metal
Rubber	92.3%	0%	7.1%
Wood	0%	88.1%	11.9%
Metal	7.1%	11.9%	80.1%

### 3.2.6 考察

2つの実験より、カーソルの軌跡を誇張して振動させる Visual Vibration によってバーチャルな物体の材質感を提示できることが示された。設計した振動モデルのうち、2つの振動様式 (B-In および B-On) は、被験者にとってバーチャルな物体がそれぞれゴムのように変形するか、もしくは木や金属のように変形しないかを判断する手がかりとなった。その結果、実験 2 においては木と金属が最も間違えて回答されたと考察できる。

また B-In に関しては、C/D 比を操作することで粘性感や抵抗感の変化が生起する pseudo-haptics にも関連すると考えられる。B-On ではカーソルは物体に衝突後それまでの軌跡とは反対方向に跳ね返るのに対し、B-In では同方向に  $A(v)$  分動いた後に跳ね返る。したがって、B-In では衝突後にカーソルに同方向の減加速が生じるため C/D 比を操作した際と同様の効果が生じていたと考えられる。

実験 1 において、Visual Vibration に本物らしさを感じられないと回答した複数の被験者について、アンケートの自由記述より 2つの傾向 (1) 全く本物に思えない、2) 本物とは思えないが理解できる) を観察した。これに対し、被験者の触覚やアニメーションの表現方法等の背景知識が影響していると仮説をたてた。本仮説を検証するために、初心者と熟練者を募った実験 2 の結果は本仮説を支持するものと考えられる。一方で Pseudo-haptics に関する先行研究において、C/D 比の操作によって生起する感覚 (粘性感、抵抗感、重さ感) がコンテンツの文脈に依存することが指摘されている[92]。本実験で Visual Vibration が全く本物に思えなかった被験者のようなユーザに対する解決策として、アプリケーションにおいて文脈を提示することが挙げられる (いくつかの例を次項に示す)。

Pseudo-haptics の興味深い点として筋電反応が現れるように、実際に固有受容感覚が生起することが挙げられる。しかし本実験結果において、正答率は全体的に高い水準であったが、実際に振動感覚が生起していたかは不明である。予備的にマウスに力センサを取り付けてグリップ力の変化やマウスの軌跡を観察したが、提示した材質感の違いによる差異は特に観察されなかった。したがって、Visual Vibration のみの提示で客観的に振動感覚ひいては触覚が生起することを示せていない。一方で実際の触振動刺激と組み合わせると同時に提示した際、振動感覚を変調する効果があることを予備実験的に確認している。先行研究においても、視覚的な粗さ感提示が皮膚感覚的な粗さ知覚を変調する

ことが報告されている[95]. 実際の触刺激を同時に提示することは Visual Vibration に文脈を与える意味でもアプリケーション開発において重要であると考えられる. ただし, 図 3-10 でも示したとおり, 視覚と触覚で感じられる振動周波数の帯域が異なる. そのため両者の適切な周波数設計に関してはさらなる調査が必要である.

### 3.2.7 アプリケーション

本項では Visual Vibration を利用した著者および著者の共同研究者が開発した 2 つのアプリケーションを紹介する. 前節でも述べたとおり, ここで紹介するアプリケーションは実際の振動刺激との組み合わせで触覚インタラクションを実装し, コンテンツによって文脈を付与している.

#### 3.2.7.1 バーチャル鍵盤打楽器

著者は Visual Vibration と HaCHIStick (4.1.2 項参照) を利用して, 叩いた鍵盤打楽器の音色だけでなく材質感も提示するバーチャル鍵盤打楽器を開発した. 本システムは PC, モニタ, オーディオアンプ, HaCHIStick および CMOS 赤外線センサ (任天堂, Wii リモコン) およびオーディオスピーカより構成される. HaCHIStick のヘッド部分にはマーカとして赤外線発光ダイオード (Light Emitting Diode: LED) が固定されており, 赤外線センサによってヘッドの位置を計測しモニタ上にばちの先端として表示する.

体験の様子を図 3-17 に示す. 本鍵盤打楽器を研究室公開 (電気通信大学, 2011 年 7 月 17 日) および情報処理学会エンタテインメントコンピューティング 2011 (日本科学未来館, 2011 年 10 月 7-9 日) にて実演展示した. 体験者の反応は「本当に木, 鉄を叩いている感じがする」「次世代ゲーム機にこの手法を組み込んで欲しい」等, 極めて良好であった. 特に前者のコメントは, 視覚的な振動および触覚的な振動に関しては現実の木や鉄を叩いたときに生じる振動とはことなるが, 体験者にとってはもっともらしく感じられていたことを示唆する.

### 3.2.8 キングコング効果

Terziman らは Visual Vibration と振動刺激と組み合わせてバーチャル空間内を歩行するコンテンツにおいてキングコング効果を実装した[169]. システムは PC, モニタ, 床面振動子, オーディオアンプ, コントローラより構成される. コントローラ操作よりバーチャル空間内のアバタを操作することができ, アバタの頭部に固定されたバーチャルカメラが撮影した映像が一人称視点でモニタに表示される. バーチャルカメラはアバタの歩行時の頭部の上下運動に加えて, アバタの足がバーチャル空間内の床に接触した際に振動する. この振動に Visual Vibration が適用されており, 例えばこの振動の振幅を増幅し実際の触刺激を同時に床面振動子より提示することで, ユーザはあたかも自分がキングコング (巨大な怪獣) となって歩行しているかのような体験を経験する.

### 3.2.9 まとめ

本研究では, 叩き動作に応じた視覚的な振動提示による材質感提示手法を考案し, 振動モデルを設計した. 振動モデルの設計では Okamura ら[134]の reality-based モデルを参考に, 様々な材質を叩いた時に生じる振動をヒトが視覚で知覚できるように変調した. ま

た、振動パラメータには材質感を提示する減衰正弦波の材質感パラメータに加え、カーソルの振動様式としてバーチャルな物体に跳ね返って振動するものとバーチャルな物体内部に侵入して振動するものの2つを実装した。被験者実験より、全ての被験者に対し設計した振動パラメータによって所望の材質感を提示することは困難であったが、一部の被験者からは振動が本物らしく所望の材質を感じられたとの報告があった。以上より、Visual Vibrationによって現実では聴覚・触覚で感じられる高周波数振動を含む振動をHVより提示できることを示した。

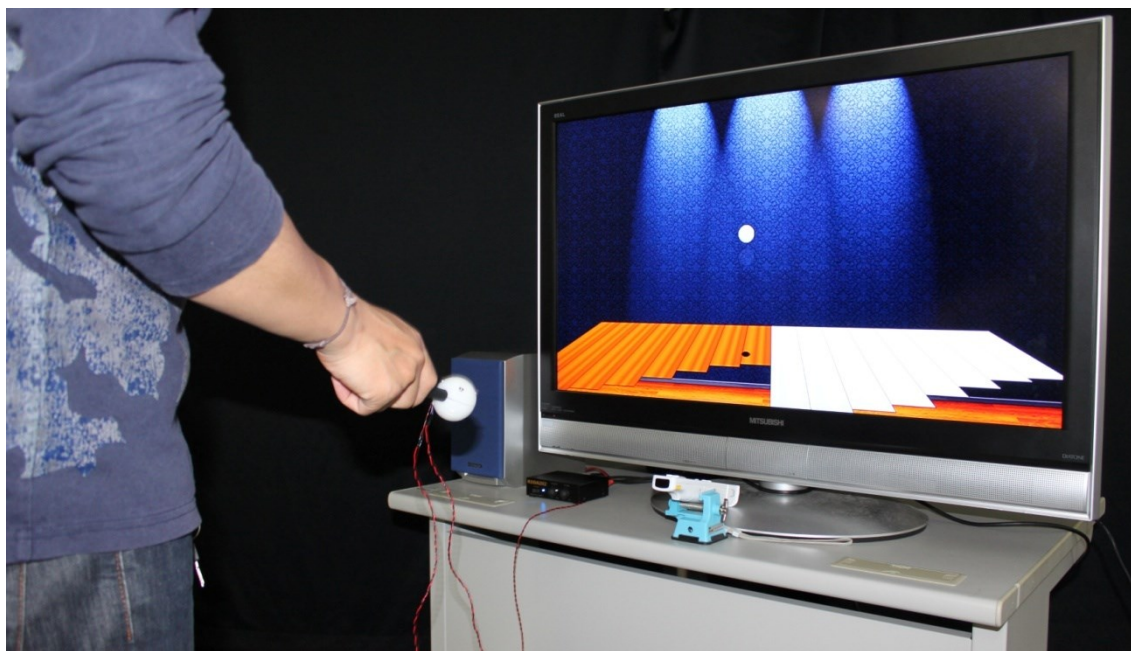


図 3-17 バーチャル鍵盤打楽器

本研究は、マウスカーソルやアバタ等のPCモニタ上のユーザの写像の運動に対して触覚提示することを目的に行われた。これに対し、触覚提示のために装置の装着を必要としない手法としてHVに着目し、現実では聴覚・触覚で感じられる高周波数振動の振幅および周波数を変調して提示する手法 Visual Vibration を実装した。これは聴触覚的な振動周波数提示・知覚を視覚により代替を試みたといえる。触覚、聴覚、視覚はそれぞれ知覚できる振動周波数帯域が異なっており、例えば触覚的に高周波な振動を視覚的に提示、知覚することは困難である。本節では物体を叩いた時に生じる振動をケーススタディとして取り扱い、Okamuraら[134]のreality-basedモデルを参考に振動周波数を変調し振動モデルの設計を行った。叩いた物体の材質感を再現するために、振動周波数を材質間の大小関係を保ちつつ、視覚的に提示、知覚可能な周波数帯域にまで低くした。また、振幅や減衰係数を変調し、2つの振動様式を実装した。その結果、ユーザは材質間の振動の差異により叩いた物体の材質を想起し所望の材質を感じることができた。以上より、本手法および本振動モデルは実感性をともなった材質感提示ができていたと考えられる。一方で、一部のユーザには所望の材質を想起させることはできなかったが、アプリケーションの設計・開発によって文脈を提示することで本手法の実感性が向上することを観察した。

以上より, 本研究は誇張表現のうち代替モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発であったといえる. また, 本手法のみで全ユーザに対して実感性のある体験を提供することはできなかったが, 文脈を提示する等をして実感性の伴う触覚インタラクションが実現できたと結論づけられる.

### 3.3 第3章まとめ

本章では、カチカチ感および Visual Vibration の 2 つの研究を挙げて、感覚 *A* を別の感覚 *B* で代替する代替モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発について述べた。本論文では、本モデルに対して現実には感覚 *B* では感じられない、感じにくい体験を経験できるという効果を主に期待した。カチカチ感に関する研究では、通常視覚的に高精細に行われる位置知覚を部分的にはあるが触覚的に行えるようになったという点で期待した効果が得られたと結論づけられる。Visual Vibration に関する研究では、通常聴触覚的に行われる振動周波数提示・知覚を部分的にはあるが視覚的に行えるようになったという点で期待した効果が得られたと結論づけられる。

2 つの研究を通じて感覚提示の信頼性が今後の研究あるいは新たな代替モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発において重要であると考えられる。感覚提示の信頼性とは、ユーザの運動に応じて常に安定して期待された感覚提示が行われていることを示す尺度である。代替モデルにおいて、代替する感覚 *B* は代替される感覚 *A* に完全に取って代わられるような効果を安定して提示ができることが望ましい。

カチカチ感に関する研究においては、ある一定角度肘を屈伸すると触刺激が返されることから、視覚が使えない状況下でも安定して同様の姿勢を取ることが可能であった。一方で、カチカチ感提示装置のカチカチ感を提示する周期が大きいことや肘の可動閾が小さいこと、装着時の装置のずれ等、触覚提示の階調性や安定性に制約があった。そのため信頼性は高かったとはいえ、視覚的運動知覚ほどの効果が得られなかったと考えられる。Visual Vibration に関する研究では、視覚的に提示するために振動の周波数や振幅を大幅に変調したため、現実の振動とは大きく異なる振動であった。そのため、一部のユーザにとっては期待した振動とは異なるように感じられ、文脈なしに聴覚や触覚の代替として扱うことは困難であったと考えられる。

感覚提示の信頼性は誇張表現全体においても、その体験を評価する尺度の一つとして用いることができると考えられる。本論文では、2.1 節でも述べたとおり、触覚インタラクションの対話性に着目した。現実世界において、例えば指で物体を叩く際、繰り返し同様の叩き方をすれば安定して同様の触刺激が返ってくる。バーチャルな触覚インタラクションにおいても、現実のように同様の動作に対して安定して期待される感覚が提示されることで実感性が向上すると考えられる。以上より、運動入力に対して信頼性のある触覚提示は体験の実感性向上において重要である。

## 第4章

# 変調モデルに基づいた触覚インタラクション

本章では著者がこれまでに設計・開発した触覚インタラクションのうち、感覚  $A$  に操作  $k$  を加えて変調する変調モデルに基づく 3 つの研究について述べる。変調モデルでは現象の差異が増幅されるのでその現象が分かりやすくなるという効果が期待される。一つ目は HaCHIStick & HACHISstack による叩き動作に応じたタッチスクリーン材質感変調に関する研究である (4.1 節)。本研究では、タッチスクリーンを叩いた際に生じる振動を変調することで、ゴムや木、金属を叩いたような体験を実現する。二つ目は拡張歯ブラシによる歯を磨いた際の体験拡張に関する研究である (4.2 節)。本研究では、歯を磨いた際に生じる振動を変調することで口腔内の感触を変えて、より歯を磨いたかのような体験を実現する。三つ目はトクトク感再現による徳利で液体を注いだ際の体験を再現する研究である (4.3 節)。本研究では、徳利から液体を注ぐ際の振動を変調することで粘性感や残量感の再現を行う。

### 4.1 HaCHIStick & HACHISstack: 叩き動作に応じたタッチスクリーン材質感変調

本節では、叩き動作に対して振動提示することでタッチスクリーンが異なる材質になったかのような体験を提供する HaCHIStick & HACHISstack の設計・開発について述べる。本システムは時間応答性に優れており、叩いた瞬間に振動提示が可能である。そのため、ユーザにとっては叩いた対象の材質が変わったように感じられる。

#### 4.1.1 研究背景

タッチスクリーン上ではタッピングやドラッグといったユーザのタッチパネルへの入力に対してスクリーンから映像を提示するといったインタラクションが提供されている。一方で、タッチ入力に対する映像による視覚提示の他にも、聴覚、触覚提示が行われている。聴覚提示において楽器演奏アプリケーションはキラーアプリケーションの一つであるといえる。ソフトウェアを変えるだけでユーザはスクリーンに表示された楽器を本物の楽器のように触れることで様々な楽器の音色を奏でることができる。

触覚提示においては、研究段階では、クリック感[38][105][141][163]から摩擦感[8]、硬さ感[73]や凹凸感[149]提示といった様々な触覚インタラクションが開発されている。またスタイラス等のデバイスを用いる場合についても、摩擦感[89]、クリック感[100]、力覚[187]を提示する手法が開発されている。しかし、現在普及しているタッチスクリーン上での触覚提示は振動モータや圧電アクチュエータによる単調な振動提示にとどまっており、聴覚提示における楽器演奏のように階調性のあるインタラクションは実現されていない。

本研究では叩き動作に対する材質感提示に着目する。叩き動作は対象物の硬さ等の性状を知る上で優れた触運動知覚である[90]。また叩き動作 (タッピング) はタッチスク

リーンの最も基本的な操作であり、前述の楽器演奏でもしばしば用いられる。さらに材質は対象物への接し方という心理的距離を表現できる手段となりうる[106]。例えば、柔らかい物体であればであれば押し込み動作による硬さ知覚を行い、また表面がざらざらした物体であればなぞり動作によって対象の粗さ知覚を行う。

本研究では、3.2.2.4 でも述べた Okamura らの叩き動作に対する振動提示による材質感再現手法[134]を利用してタッチスクリーンの材質感変調を行う。具体的には、タッチスクリーンを叩いた時に生じる振動を変調することでユーザにタッチスクリーンの材質が変わったかのような体験を提供する。これを実現するために、本項ではまずユーザが叩いた瞬間に振動提示が可能なスティック HaCHIStick の設計・開発について述べる。本スティックはボイスコイル型リニアアクチュエータを内蔵しており、応答性および階調性に優れている。次に、叩き動作に対する自然な材質感変調を実現するためのタッチパネル HACHISstack の設計・開発について述べる。本タッチパネルは光遮断方式を応用した構造で、高速かつ正確に接触速度計測および接触時刻予測を行う。最後に HaCHIStick と HACHISstack を組み合わせて、タッチスクリーン上での叩き動作に対して応答性の良い振動提示を行うことでタッチスクリーンの材質感を変調するシステムを実装し、振動提示に対する遅延検知閾を計測することでシステムを評価する。

#### 4.1.2 HaCHIStick : 材質感提示のための振動提示スティック

本節では振動提示スティック HaCHIStick<sup>3</sup>の設計・開発について述べる。本項ではまず、スタイラス把持型の触覚拡張現実（触覚 Augmented Reality: 触覚 AR）の先行研究について述べる。次に実物体への叩き動作に対して材質感変調を行う手法について述べ、それを実現するための振動提示スティック HaCHIStick の実装について述べる。最後に簡便な材質感再現実験によって HaCHIStick の材質感提示性能を評価する。

##### 4.1.2.1 先行研究

触覚 AR は触覚研究において新しい領域であり[9][75]、視覚・聴覚 AR と同様に現実では感じられない情報を感じられる（触れられる）ようにするものである。触覚 AR システムは一般的に触覚提示装置と環境を計測するためのセンサから構成される。

例えば、触覚インタラクションにおいて基本的な硬さ感提示に関する触覚 AR が実現されている。Nojima らの SmartTool は力提示装置と先端にセンサが固定されたスタイラスから構成される[115]。センサの計測値によって力を提示し、通常ユーザが触れることのできない境界線（水と油の境目）がまるで硬い壁になったかのような感覚を提示する。Jeon と Choi らは実物体の硬さを変調する触覚 AR システムを開発した[75]。システムは力提示装置と力センサが取り付けられたスタイラスから構成される。力センサは実物体からの反力を計測し、それに応じて力を提示する。このシステムを用いると、例えば、スポンジをスタイラスで押ししているにも関わらずレンガを押ししているような感覚が生じるというような実物体の硬さ感を変調される触覚 AR が実現できる。五十嵐らは実物の液体から返される反力に力提示装置からの力を重畳することで液体の粘性感や水流

---

<sup>3</sup> Haptic Computer-Human Interaction Stick の略。著者名も埋め込まれている。



の再現を行った[68]。しかし、これらの先行研究は主に力提示装置を用いた主に固有受容感覚提示に着目した触覚 AR である。

Kyung と Lee の Ubi-Pen[89]および Lee らの Haptic Pen[100]はスタイラス型の触覚 AR 用の触覚提示装置であり、触覚提示のための振動子やソレノイドを内蔵している。これらのシステムでは固有受容感覚提示には実物体から自然に返ってくる反力を利用し、そこに振動等の皮膚感覚提示を重畳することでタッチスクリーン上のボタンのクリック感等を再現している。これらの手法は力提示装置を必要としないのでシステムが簡便である。

#### 4.1.2.2 HaCHIStick

##### 材質感変調手法

本手法では、実物体をスティックで叩いた時に生じる実際の力を利用し、接触の瞬間にスティックに内蔵した振動子より減衰正弦波振動を提示することで材質感の変調を行う。しかし、単純に接触の瞬間に振動提示するだけでは実際に生じる振動があるため、所望の振動のみを提示できない。そこで実物体とスティックの接触部の間にゲルシートを挟むことで、実際に生じる振動（高周波成分）を吸収し力（低周波成分）だけが生じる状況をつくりだした上で、振動提示を行う。

本手法を実装するためには減衰正弦波を接触の瞬間に提示する必要がある。触覚提示の遅延に関して調べた先行研究[57][131][133] [143]より、位置計測などのセンシングから触覚提示を行うシステムの制御はミリ秒単位で行う必要があるといえる。したがって、本手法においても、高い応答性をもったシステムの設計・開発が必要となる。本項では高い応答性をもつスティック型振動提示装置 HaCHIStick の設計・開発について述べる。なお、高い応答性をもった接触検知装置の設計・開発については次項で述べる。

##### 実装

HaCHIStick の第一試作の外観および内部構造を図 4-2 に示す。ヘッド部分は ABS 樹脂製、柄の部分はアルミニウム丸パイプで作成した。柄の部分には高い応答性と階調性をもつボイスコイル型リニアアクチュエータ (Tactile Labs, Haptuator) [191]を内蔵した。長さおよび重さはそれぞれ 200mm, 90g であった。

図 4-1 に HaCHIStick の周波数応答性能を示す。x 軸は周波数、y 軸は振動加速度の振幅を表す。本データは正弦波（振幅 1Vrms ; 10-500Hz までを 10Hz 間隔）をアクチュエータに印可した際の柄に固定した加速度センサ (Kinonix, KXM52-1050) の値である。

#### 4.1.2.3 材質感検証実験

本材質感変調手法および HaCHIStick による材質感提示性能を検証するために実験を行った。

##### セットアップ

本実験では HaCHIStick, パッド, オーディオアンプおよびマイクロコントローラより構成されるシステムを用いた (図 4-3)。接触検知および振動提示はマイクロコントローラ (NXP Semiconductors, mbed NCP LPC1768) より 10kHz のリフレッシュレートで制御した。

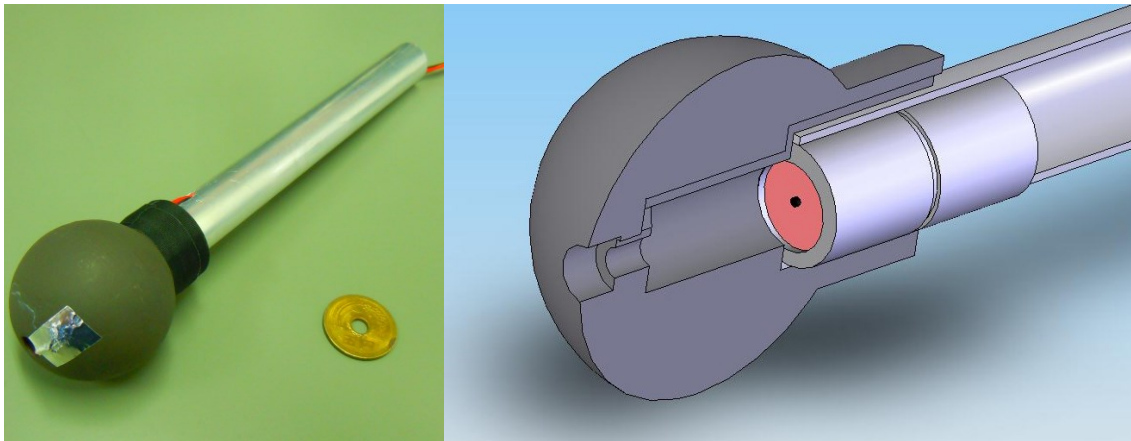


図 4-2 HaCHIStick 第一試作 : 左) 装置の外観 (200mm, 90g),  
右) 内部構造 (ボイスコイル型リニアアクチュエータを内蔵)

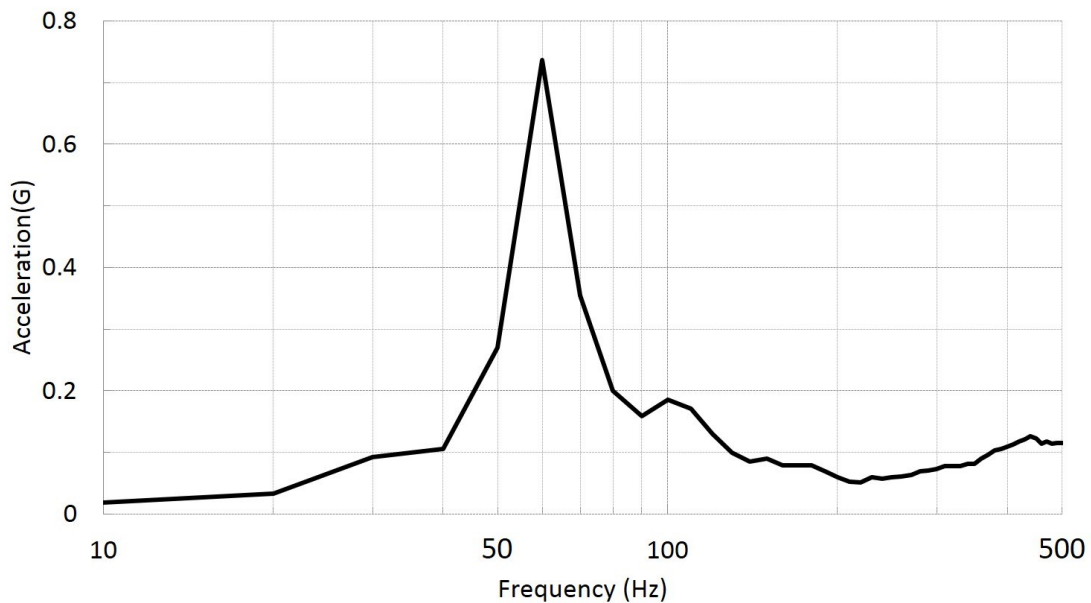


図 4-1 HaCHIStick の周波数応答性能 :  
x 軸は周波数, y 軸は振動加速度の振幅を表す

HaCHIStick のヘッド部分には導電塗料を塗布し、マイクロコントローラの  $V_{CC}$  電源に接続した。パッドはゲルシートとアルミニウム箔より構成された。ゲルシートには振動緩衝材として用いられるスチレン系エストラマを用いた。これにより、HaCHIStick が接触した際の振動を吸収した。アルミニウム箔はゲルシートの上に固定し、マイクロコントローラの I/O ポートおよびプルダウン抵抗を介してグラウンドに接続した。パッドの厚さは約 3mm であった。

HaCHIStick のヘッド部分がパッドと接触すると、まずゲルシートによって振動が吸収される。同時に、パッドに接続された I/O ポートの状態が low 状態から high 状態にな

ることを利用して接触検知を行った。そして、マイクロコントローラの D/A ポートより減衰正弦波の信号が出力され、オーディオアンプ (Rastem Systems, RSDA202, 20W 出力) で増幅し HaCHIStick に内蔵されたアクチュエータを駆動した。接触検知からアクチュエータの駆動までにかかる遅延は最大で 0.1ms であった。

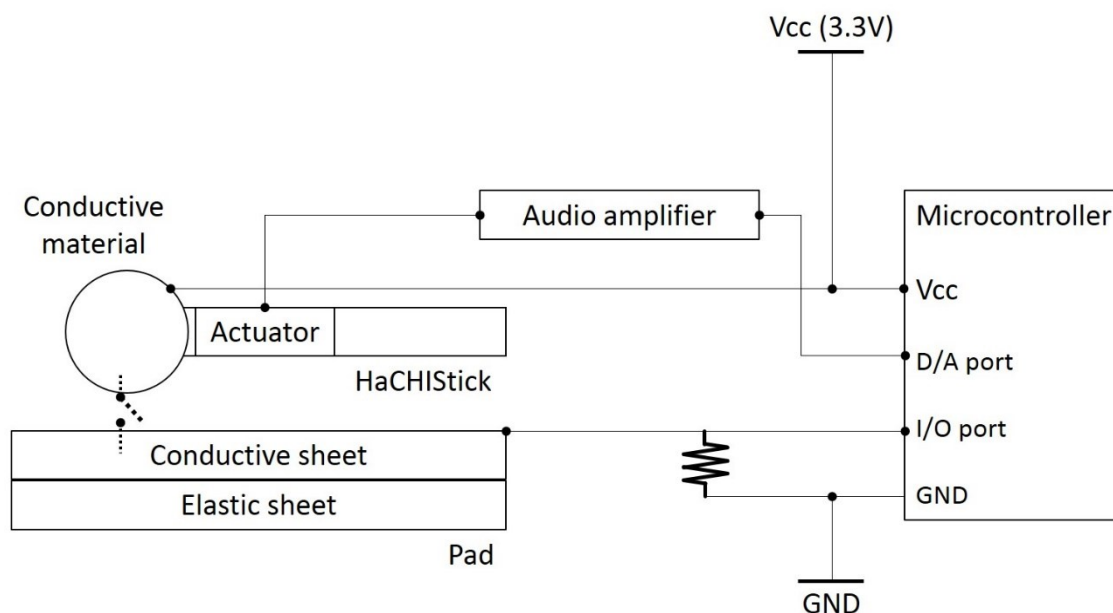


図 4-3 実験で用いたシステム

図 4-4 に示すように、本実験では 3 つのパッドと 3 つの実物体 (ゴム, 木, 金属) をアクリル板に固定したものをを用いた。パッドと実物体のサイズはともに  $50 \times 50 \times 3\text{mm}$  であった。3 つのパッドを叩いた時にはそれぞれゴム, 木, 金属のいずれかの減衰正弦波モデルの振動を重複なく提示した。式(1)の減衰正弦波のパラメータは Okamura らのモデル[134]を参考に決定した (表 4-1)。ただし、本実験で用いたシステムは接触速度が計測できないため、接触速度を一定とし初期振幅値は固定値とした。

#### 実験手続き

図 4-4 に示すように、被験者はアクリル板が設置された机の前に着席した。被験者は 3 つのパッドを叩き比べて感じた材質をそれぞれに対し 3 つの候補 (ゴム, 木, 金属) から選択した。選択は重複のないように行われた。被験者がパッドおよび実物体を叩く回数および時間については制限がなく、試行中は自由に叩き比べることができた。また、本実験では用いたアクチュエータおよびシステムの制約上十分に大きい振動が提示できなかつたため、実験者は被験者にパッドおよび実物体を叩く際は軽く叩くように指示した。被験者は実験終了まで正答については教示されなかつた。被験者はこの試行を 3 回繰り返した。

本実験には 12 名 (男性 11 名, 女性 1 名 ; 20 から 35 歳 ; 全員右利き) が参加した。被験者は全員本手法に関してナイーブであった。

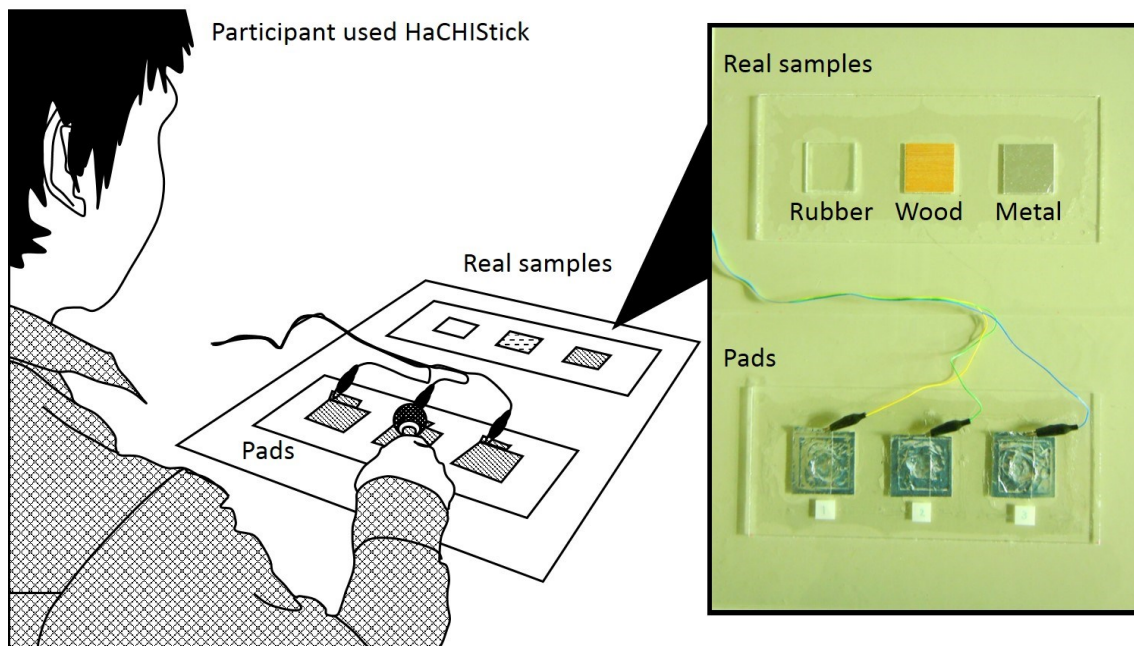


図 4-4 実験セットアップ

表 4-1 減衰正弦波のパラメータ

	$A$ [ $\text{m/s}^2$ ]	$B$ [ $\text{s}^{-1}$ ]	$f$ [Hz]
<b>Rubber</b>	<b>1.0</b>	<b>60</b>	<b>30</b>
<b>Wood</b>	<b>0.7</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
<b>Metal</b>	<b>1.3</b>	<b>90</b>	<b>300</b>

### 実験結果・考察

1名の被験者が実験終了後に振動提示を無視するようにして回答したと報告したため、該当のデータは以下に述べる分析からは取り除いた。

本実験で得られた3つの振動モデルに対する回答率を表4-2に示す。チャンスレート33.3%に対して正答率（表中の黄色で示したセル）は70%以上であった。金属の正答率が最も高かった（90.9%）一方で、ゴムと木が最も間違えて回答された。

表4-3に全正答（3つ全ての材質を正しく回答できた）率の推移を示す。全体の全正答率は72.2%であった。全正答率は試行数が増えるに連れ上昇し、3試行目ではほとんどの被験者が全正答できた（90.9%）。

本実験での全正答率は、力提示装置を用いた Okamura らのバーチャル物体の材質感提示における同様の実験に対する正答率（83.3%）[134]よりも低かった。一方で、3試行目のみの全正答率に関しては Okamura らの結果（85.7%）とほぼ同じ水準であった。また、ゴムと木を間違える傾向や試行数が増えるにつれて全正答率が上昇する傾向にお

いても同様の傾向を示した。以上の本実験結果より、バーチャルな物体の材質感提示と同様に本手法によって実物体の材質感変調が可能であることが示唆された。

表 4-2 実験結果：3つの振動モデルに対する回答率。  
黄色で示したセルは正答を表す。

Answer	Vibratory parameters		
	Rubber	Wood	Metal
Rubber	81.8%	18.2%	0.0%
Wood	18.2%	72.7%	9.1%
Metal	0.0%	9.1%	90.9%

表 4-3 実験結果：全正答（3つ全ての材質を正しく回答できた）率の推移。

First trial	Second trial	Third trial	Overall
54.5%	72.2%	90.9%	72.7%

### 4.1.3 HACHISStack：材質感変調のためのタッチパネル

本項では叩き動作に対する自然な材質感変調を実現するためのタッチパネル HACHISStack<sup>4</sup>の設計・開発について述べる。本項ではまず、材質感変調を実現するためのタッチパネルのために必要な設計要請を先行研究より定義する。さらにタッチスクリーンへの入力技術についての先行研究について述べ、本タッチパネルの HCI 研究分野での立ち位置を示す。次に HACHISStack の実装について述べる。本タッチパネルは2層の光遮断方式接触検知モジュールを利用することで高速に接触検知および接触速度計測、さらに接触時刻予測を実現する。そして本タッチパネルの接触速度計測および接触時刻予測の性能を検証するための実験について述べる。本項の最後に本タッチパネルのアプリケーションとして HaCHISStick と組み合わせた材質感変調手法を含む3つのアプリケーション：1) 低遅延材質感（ゴム、木、金属）提示；2) キーの強弱表現が可能なバーチャルピアノ；および3) 触覚フィードバックをもった拡張鍵盤打楽器（木琴、鉄琴）、の実装について述べる。

#### 4.1.3.1 先行研究

##### 低遅延かつ接触速度計測可能なタッチパネル

タッチスクリーン上での触覚インタラクションの質を高めるための一般的な課題として、遅延の低減および接触速度の計測が挙げられる。先行研究[131]より、わずか5msの遅延が硬さ弁別に影響を及ぼすことが知られている。また次項で詳しく述べるが、タ

<sup>4</sup> Haptic and Auditory Computer-Human Interaction Stack の略。著者の名前も埋め込まれている。

タッチスクリーン上での入力に対する遅延はユーザビリティを低下させることが指摘されている[74][78][112][113]. 先行研究の報告を踏まえると, 本研究が目指す叩き動作に対する自然な材質感変調を実現するためにはタッチスクリーンへの接触検知から振動提示まではミリ秒単位で高速に行う必要がある. したがって, 現在の市販タッチパネルの接触検知で生じる数十 ms 以上の遅延は許容できない.

また接触速度はタッチスクリーンに触れた際に生じる振動の初期振幅を決定する[35][90]等, 触覚提示において重要である. 触覚提示に限らずとも, 接触速度の計測はスクリーン上でのインタラクションの質の向上について期待できる. 例えばタッチスクリーン上でのピアノ演奏において, 演奏者がキーの強弱を単純に叩く速度によって制御することが可能となる.

さらに, 本材質感変調手法をタッチスクリーン上でのインタラクションに適応するためには非接触での接触検知が必要である. これは接触検知時に生じる振動等が所望の振動提示を妨げるためである. 以上から本研究では, 低遅延な接触検知および接触速度計測が非接触で可能であるタッチパネルの設計・開発を試みる. 非接触での接触検知を行うためにはスクリーン上方での計測が必要となる.

#### スクリーン周辺でのインタラクション

タッチスクリーン上 (on the screen) だけでなくスクリーン上方や下方等, スクリーン周辺 (around the screen) をインタラクション空間として利用する研究が行われている (図 4-5). 多くの研究では複数台の外部カメラとマーカ[12][26][118][159]もしくは静電容量センサ[144]を用いることでスクリーン上方 (above the screen) でのユーザの動作を計測する. 例えば, Benko らは三次元シースルーHMD, タッチスクリーンおよび三次元位置計測可能なデータグローブを組み合わせたシステムを開発した[12]. ユーザがスクリーン上に表示された2次元物体に対して把持動作を行うと, 物体の三次元モデルがディスプレイ上方に出現し, ユーザはそれを三次元的に操作することが可能となる.

スクリーン上方に新たなインタラクション空間をつくる目的でしばしば半透明なスクリーンが用いられる. Matsushita らの HoloWall は赤外線カメラ, プロジェクタおよび赤外線 LED アレイから構成される[29]. スクリーン後方の赤外線 LED および赤外線カメラによってスクリーン上もしくは上方にあるユーザの手の動きを計測し, それに応じた映像をプロジェクタよりスクリーン上に投影する. Wilson の TouchLight も同様に赤外線光と2台の赤外線カメラを用いることでスクリーン上・上方の手の位置を計測する[183]. Izadi らの SecondLight はスクリーン, 強誘電性シャッタ, 2台のカメラおよびプロジェクタをより構成されるタッチスクリーンシステムである[72]. カメラによってスクリーン上・上方の物体を認識し, プロジェクタからの映像表示を高速に切り替えることで, 映像をスクリーン上だけでなく, 例えばスクリーン上方にかざされた紙面に投影することを実現した.

Microsoft の Kinect のような深度計測が可能なカメラもしばしばタッチスクリーン上方でのユーザの動作を計測するために用いられる. Wilson らは深度カメラとスクリーンを組み合わせることでスクリーン上方での様々なインタラクションを設計した[11][14][50][62][184][185]. 深度カメラを利用する利点の一つにユーザの動作計測に関してマーカや複雑な処理を必要としないことが挙げられる. またインタラクション空間を

簡便に拡張できることも利点の一つである。例えば、LightSpace は一部屋分のインタラクション空間をもち、ユーザは複数のスクリーンに対してインタラクションを図ることができる[185].

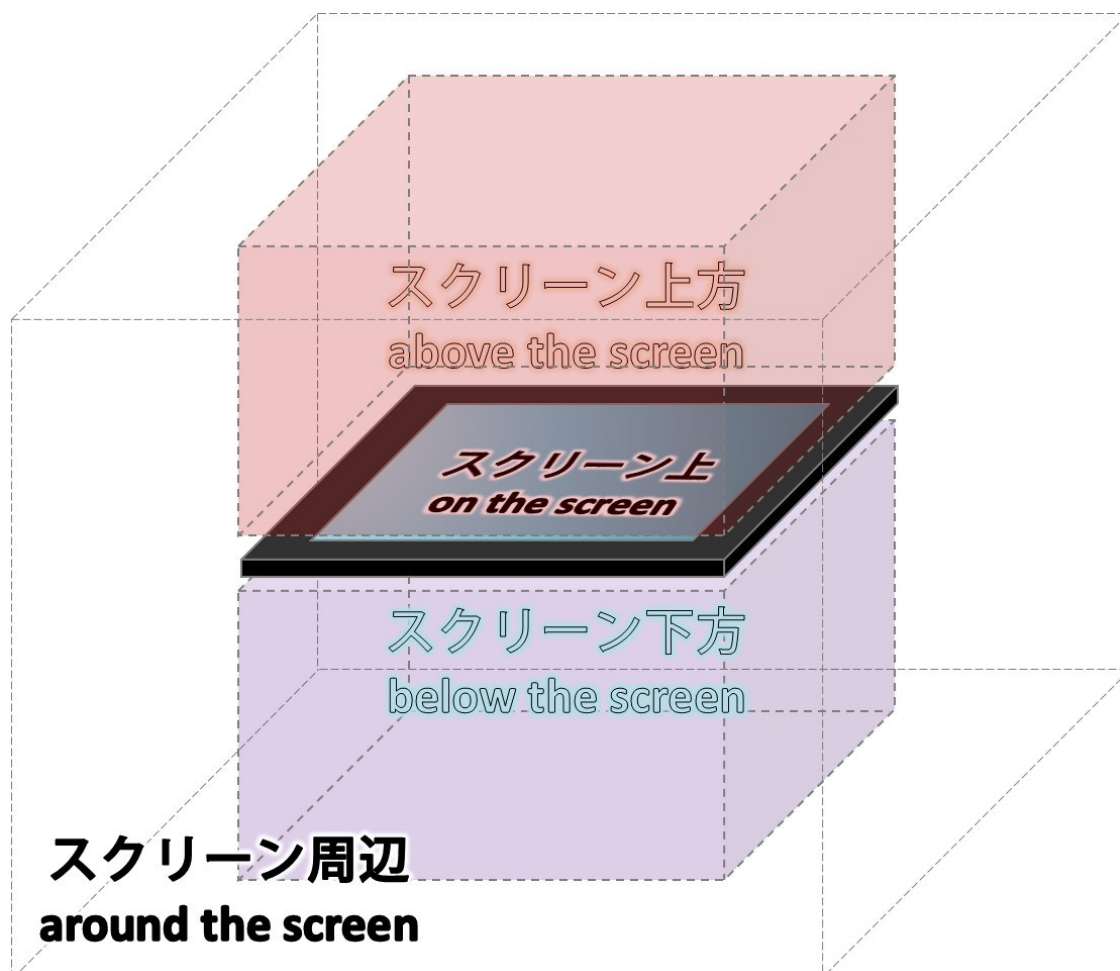


図 4-5 スクリーンとインタラクション空間

カメラ以外のデバイスを用いたスクリーン上方でのインタラクションについても研究開発されている。例えばデジタイザはスクリーンに近接するスタイラスの位置を検知することができる。Grossman らはこれを利用してスタイラスのスクリーン上方での動作より interface widgets と呼ばれる Graphical User Interface (GUI) メニューを起動させる HoverWidgets を開発した[46]。Subramanian らは層の概念を取り込むことでスクリーン上方でのスタイラス入力を拡張した[160]。また LucidTouch はモバイルデバイスにおいてスクリーン下方 (below the screen) からの操作を可能とした[182]。SideSight[19]、HoverFlow[84]や Medusa[2]は赤外線近接センサを用いることで、Abracadabra[51]は磁石と磁気センサを用いることでスクリーン周囲でのユーザの動作計測を実現した。

このように様々なスクリーン周辺でのインタラクション手法が開発されており、その有用性が述べられてきた。本項はスクリーン上方でのユーザの指もしくは物体の位置を検知し、接触速度を計測する手法を実現することで新たなタッチスクリーンとのインタラクションの設計・開発を試みる。

### タッチスクリーンに内蔵されたセンサを用いた接触速度計測

一般的に速度は距離が既知である 2 点の通過時刻を計測することで求められる。したがってスクリーンへの接触速度を計測するためにはスクリーンに対して法線方向の物体の位置を計測する必要がある。現在スマートフォン等で多く採用されている静電容量センサによる接触検知[144]では、指や専用のスタイラス等の物体が近づくことで生じるスクリーン上の静電容量の変化（静電結合）を計測し接触検知を行う。静電結合は物体がスクリーンに接触していない近接状態でも観測できるが、物体の形状や導電特性等の差異より法線方向の位置を定量的に計測することは困難であり、速度計測において正確性に欠ける。同様に、加速度センサ、圧力センサおよびマイクロホン[138]を用いた計測は加速度、圧力および音圧から速度への変換が必要であり、正確な速度計測には適さないと考えられる。また、いずれも本材質感変調手法が理想とする非接触での接触検知が困難である。

### カメラを用いた接触速度計測

テーブルトップインタフェースにおいて、接触速度を計測する手法の一つとして赤外光の拡散をカメラにより計測する手法が挙げられる。Frustrated Total Internal Reflection (FTIR) [49]と呼ばれる手法では、スクリーン上に均一に満たされた赤外光の層をつくり、その層に接触、近接した指に反射した赤外光をカメラより撮影してスクリーン 2 次元平面上の位置を計測する。反射光の光量を計測することでおよそその法線方向の位置を計測可能であるが、正確に接触速度を計測するためには精密な校正が必要である。Z-touch は多層の赤外光の層と高速カメラを利用することで、法線方向の指の動作（指のスクリーンに対する傾き）の計測を実現した[165]。

以上のように深度カメラや複数台のカメラより法線方向の位置を計測することが可能であり、また非接触での接触検知が可能である。しかし、カメラのサンプリングレートやバッファにより数十ミリ秒の遅延が生じてしまう。したがって、カメラを用いた手法では触覚提示において硬さ知覚に影響を与える 5ms の遅延[131]、およびバーチャルな楽器演奏において許容される 70-80ms の遅延 ([117]より算出) を下回ることが困難である。そこで本研究では光センサを用いた接触検知手法に着目した。

### 光センサを用いた接触検知および接触速度計測

光センサを用いた接触検知は、LED 等の光源から光を射出し、物体によって遮蔽、反射された光を光センサで検出することにより非接触で行われる。光センサを用いた手法の利点の一つに高速なサンプリングが可能であることが挙げられる。

光センサを用いた接触検知は光源と光センサの構成によって 2 種類の接触検知方式に分類できる。一方は光源と光センサを 2次元平面上に格子状に配置し、光の反射を検出するものである[31][60][63][64][152] (図 4-6 上)。Hodges らは LED と光センサの対をスクリーン背面に格子状に配置し、接触あるいは近接した物体の 2次元位置を計測する ThinSight を開発した[63]。Microsoft Surface 2[152]や BiDi スクリーン[60]も同様の実装を採用している。Echtler らは LED アレイより、LED を光源および光センサの両方として用いることで同様の位置計測を実現した[31]。しかしこの方式は FTIR[49]と同様に、法線方向の位置を定量的に計測するために精密な校正を必要し、しばしば近接した指をスクリーンに接触したと誤検知してしまう「迷い指誤検知」が生じる。



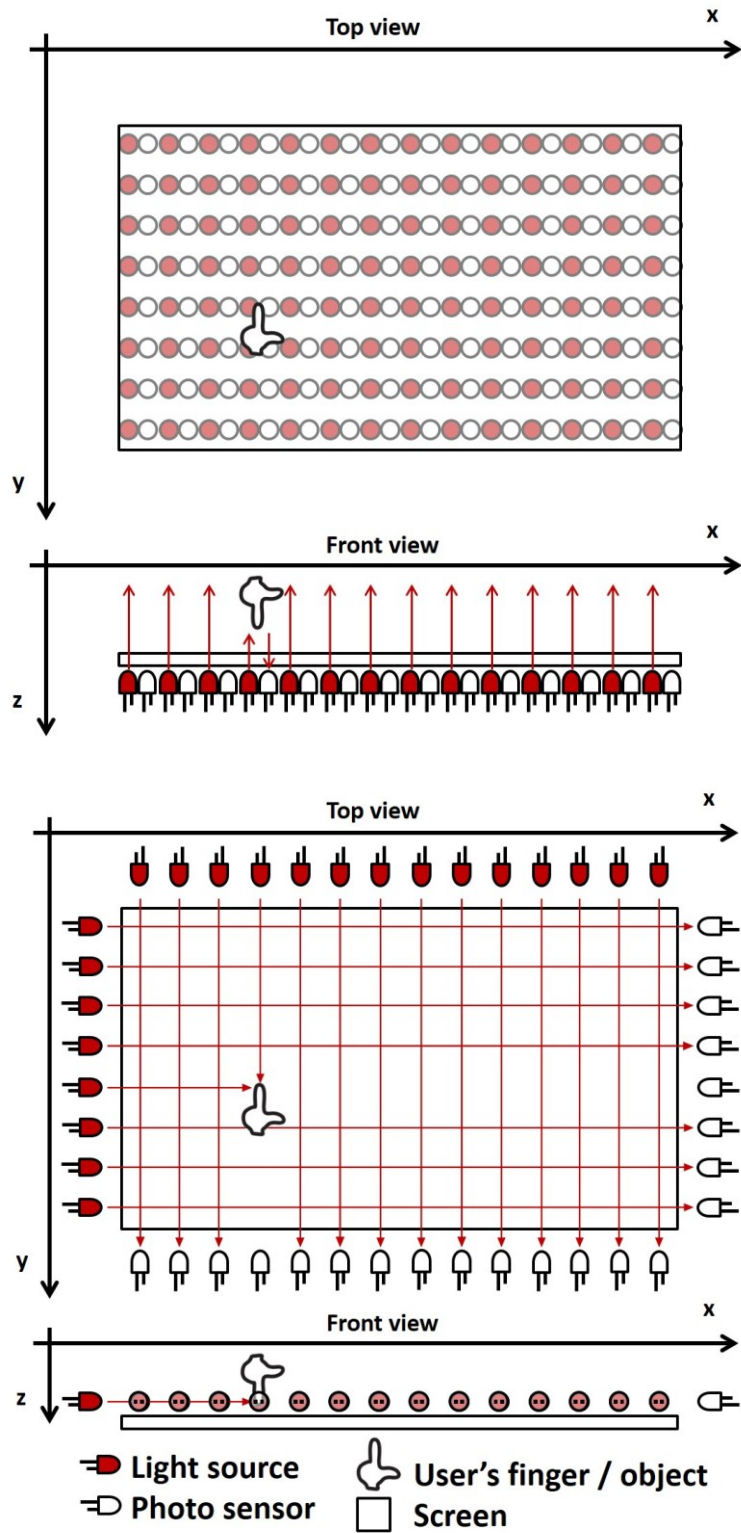


図 4-6 光センサを用いた接触検知：  
上) ThinSight 方式[63], 下) 光遮断方式

もう一つの方式は光遮断方式と呼ばれ、図 4-6 下のように光源と光センサをスクリーンの x 軸, y 軸上に延長上に対面させて配置する. 例えば指が領域内部にあると光源からの光が遮断され, それを光センサが検出する. このようにして光遮断方式は指の二次元平面上の位置を計測する. 本方式は ATM のタッチスクリーンや市販の外付けタッチパネルに採用されている. ZeroTouch は本方式を応用し, 多点接触検知を実現した[126].

#### 4.1.3.2 HACHISack

##### 非接触で低遅延かつ接触速度計測可能な接触検知

HACHISack では低遅延な接触検知が可能な光遮断方式を採用した. 接触速度を計測するために x 軸と y 軸の接触検知モジュールを分割し垂直方向に積層した. したがって, 図 4-7 に示すように, x-y 軸間, つまり z 軸方向にギャップができる.

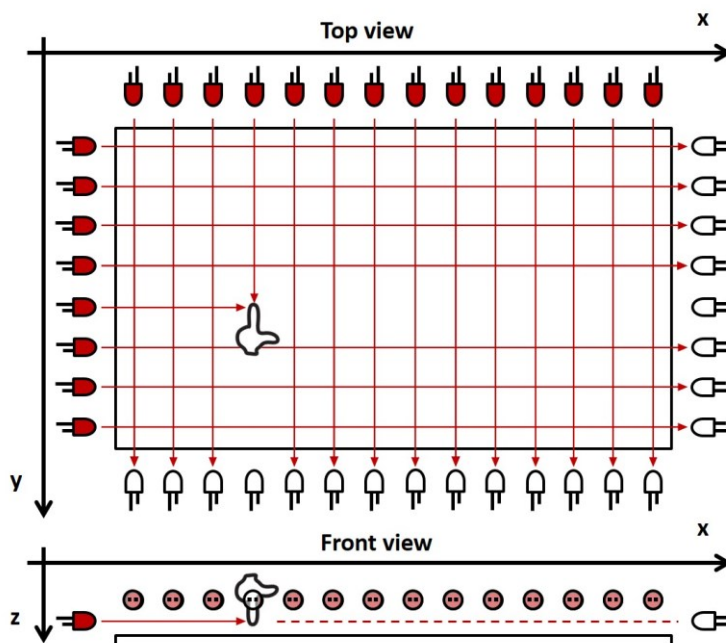


図 4-7 HACHISack の光源および光センサの配置：2層の光遮断方式接触検知モジュールから構成される

図 4-8 に示すように, 既知であるギャップ  $d_1$  を各接触検知モジュールにおける光遮断の時間差  $t_2-t_1$  で除することで接触速度  $v$  を計測することが可能である. さらにスクリーンとの接触時刻  $t_3$  は既知である y 軸接触検知モジュールとスクリーン間の距離  $d_2$  を計測された接触速度  $v$  で除することで予測できる. 本接触時刻予測は物体が等速運動することを仮定しており, y 軸接触検知モジュールを通過後に物体の速度が急激に変化しない限り正確に予測可能であると考えられる.

##### 第一試作

図 4-9 に 2 層の接触検知モジュールから実装した HACHISack の第一試作を示す. 各センシング領域を 8 個のレーザモジュール (Wenta Electronic, LM-102-B) およびその延長上に対面するように配置された 8 個のフォトランジスタ (新日本無線, NJL7502L) より構成した. 2 つの接触検知モジュールをレーザの光軸が直角するように垂直方向に積層した. したがって各接触検知モジュールは一次元の位置計測を行う. 本試作のワー

クスペースは  $94 \times 94 \text{mm}$ , 2次元 (xy 平面) 位置計測の解像度は  $12 \text{mm}$  であった. また  $d_1$  および  $d_2$  はそれぞれ  $7 \text{mm}$  および  $3.5 \text{mm}$  であった

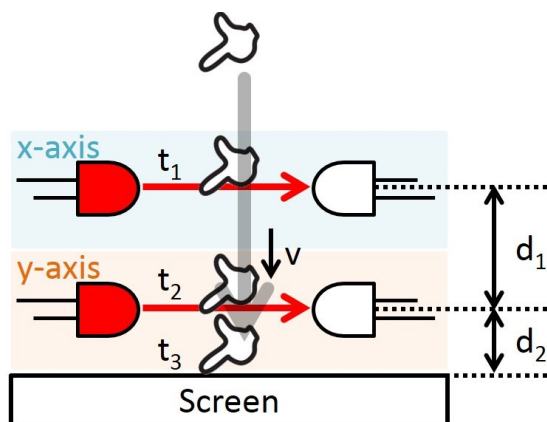


図 4-8 接触速度計測および接触時刻予測の原理 (簡単のため x 軸と y 軸の接触検知モジュールの光軸は平行にした)

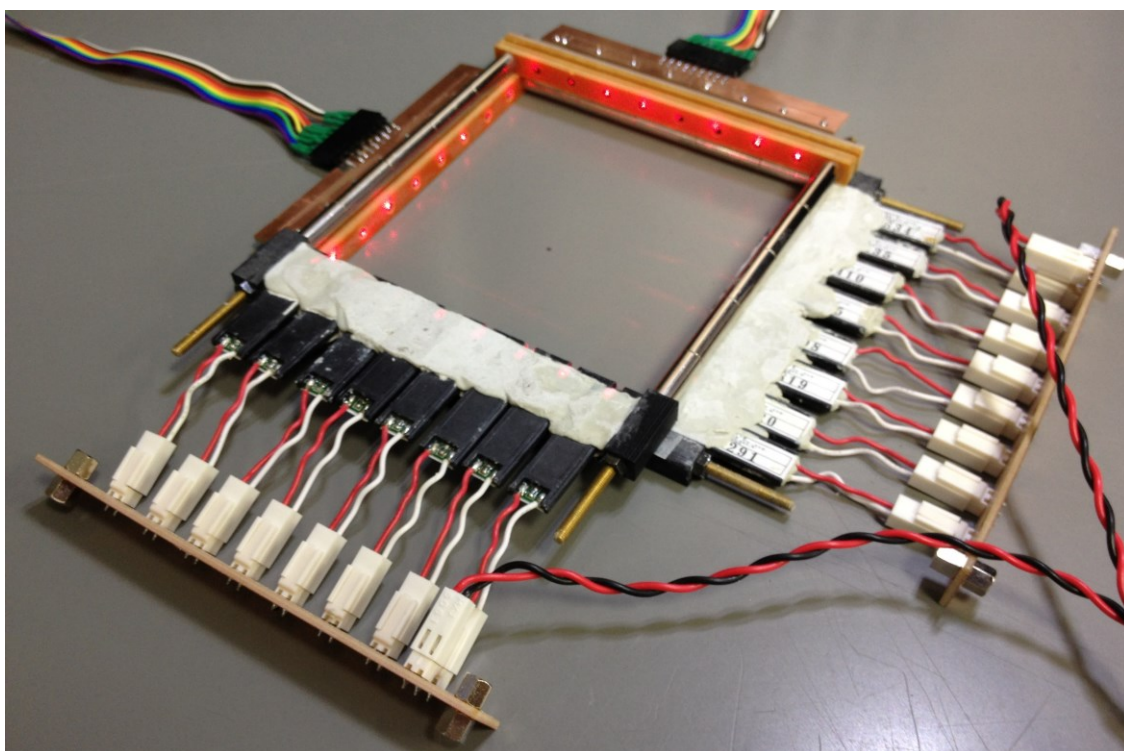


図 4-9 HACHIShield の第一試作

図 4-10 に示すように, 各レーザモジュールは対面したフォトトランジスタに向かってレーザ光を射出する. 各フォトトランジスタの受光状態はシフトレジスタ (東芝, 74HC165) を介して Serial Peripheral Interface (SPI) 通信によりマイクロコントローラ (NXP Semiconductors, mbed NCP LPC 1768) に送信される. SPI クロックを  $24 \text{MHz}$  に設定した際, 全 16 個のフォトトランジスタの受光状態を取得し, 接触位置および接触速度計測するまでにかかった時間は  $0.031 \text{ms}$  であった. 計測に必要な時間はフォトトラ

レジスタの数に比例して増加するが、SPI クロックをより高速に設定することや計測回路を並列化することで数百個のセンサを十分に短い時間で取得することができる。

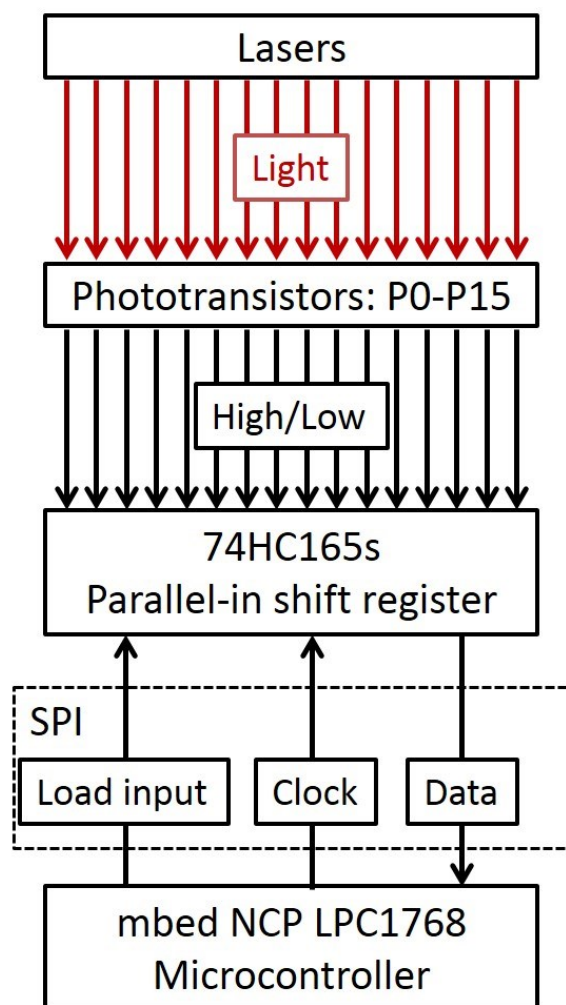


図 4-10 HACHISStack のシステム構成

本システムのサンプリングレートを 10ksps に設定した。本システムはマイクロコントローラ内でシステムが閉じられているため、通信や OS 内のバッファ等による遅延が生じない。したがって、次項で述べる振動提示を行うシステムでは接触検知からアクチュエータを駆動するまでに生じる遅延は 0.1ms (サンプリングレート 10ksps の逆数) であった。

#### 4.1.3.3 接触速度計測精度検証実験

HACHISStack の接触速度計測の性能を検証するために自由落下運動を用いた実験を行った。

##### セットアップ

図 4-11 に示すように、HACHISStack をテーブルに設置し、定規をテーブルに対して垂直に固定した。実験者は直径 28mm、質量 12g のゴム球を手動で高さ  $h$  {25, 50, 75, 100,

200, 300, 400, 600, 800, 1000} mm より落下させた。空気抵抗を無視した場合、テーブルへの接触速度の理論値  $v_{theoretical}$  は次式で求められる。

$$v_{theoretical} = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

$g$  は重力加速度 ( $9.80665\text{m/s}^2$ ) である。したがって、接触速度の理論値  $v_{theoretical}$  は {0.700, 0.990, 1.223, 1.981, 2.426, 2.801, 3.430, 3.961, 4.429} m/s であった。実験者は各高さ  $h$  に対して 10 回ずつ、100 回の接触速度  $v_{measured}$  を計測した。

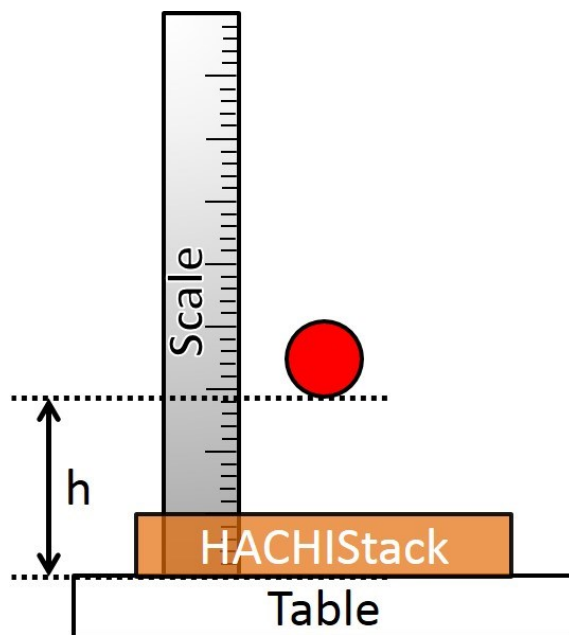


図 4-11 自由落下するゴム球を用いた接触速度計測実験の設備構成

#### 実験結果

図 4-12 に 100 対の接触速度の理論値  $v_{theoretical}$  (x 軸) と計測値  $v_{measured}$  (y 軸) を示す。得られたデータに対して線形回帰分析を行ったところ、強い相関 ( $R^2=0.9711$ ;  $p<0.001$ ) を示した。およそ 3m/s まで、接触速度が速くなるにつれて計測値のばらつきが大きくなり、それ以降はばらつきが小さくなる傾向が見られた。前者の原因の一つにゴム球を手動で落下させたため、余計な位置・運動エネルギーがゴム球に与えられたことが考えられる。また後者に関して、HACHISStack の接触速度計測に関する制約として、接触速度が速くなるほど解像度が落ちることが挙げられる。極端な例として、2 層の接触検知モジュールの通過時間差がサンプリグレート未満であった時、 $t_2-t_1$  は 0 と見なされて、接触速度を計算することが不可能となる。

#### 4.1.3.4 接触時刻予測精度検証実験

HACHISStack の接触時刻予測の性能を検証するために実験を行った。

#### セットアップ

図 4-13 に示すように、HACHISStack をアルミニウム箔が敷かれたテーブルの上に設置した。アルミニウム箔はマイクロコントローラの I/O ポートおよびプルダウン抵抗を介してグラウンドに接続されていた。また本実験では接触子としてスティックを用いた。

前項で述べた接触検知方法と同様に、本スティックはの先端は導電塗料が塗布されており、マイクロコントローラの電源 (3.3V) に接続されていた。スティックの先端がアルミニウム箔と接触すると、通電により接触時刻を正確に検知することができる。本実験ではこの接触時刻を実際の接触時刻  $t_{actual}$  として用いる。

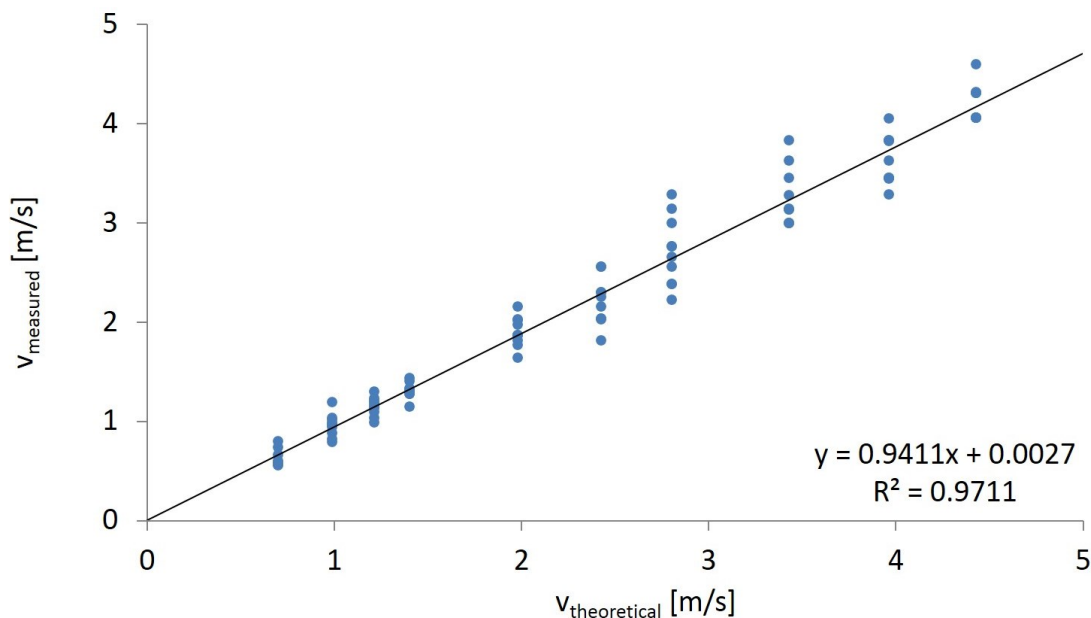


図 4-12 接触速度計測実験結果：

x 軸および y 軸はそれぞれ接触速度の理論値および計測値を示す。

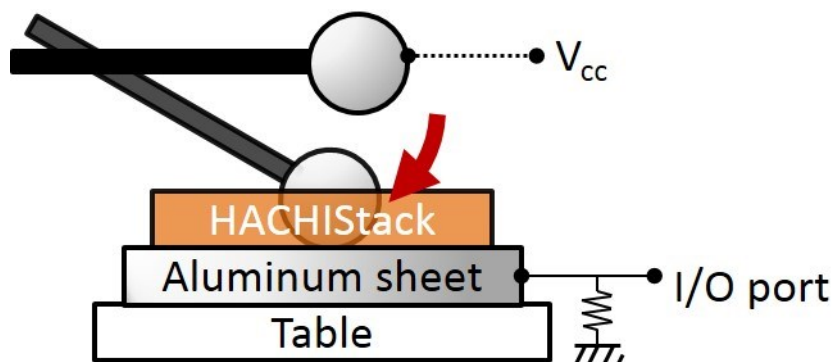


図 4-13 接触時刻予測実験の設備構成

本実験には 3 名 (男性 1 名, 女性 2 名 ; 24-26 歳) が参加した。参加者は様々な速度で 100 回スティックによってアルミニウム箔を叩いた。本実験では HACHISStack より計測された接触速度  $v$  と予測された接触時刻  $t_{predicted}$ , および I/O ポートより計測された実際の接触時刻  $t_{actual}$  を記録した。

### 実験結果

図 4-14 に全 300 試行分の実験結果を示す。グラフの x 軸は接触速度を, y 軸は実際の接触時刻と計測した接触時刻の差 ( $|t_{actual} - t_{predicted}|$ ) を示す。本結果より, 接触速度が 0.2m/s 未満の時, 接触時刻予測の誤差が秒単位と非常に大きくなるのが分かる。この

誤差の原因として、HACHIS<sub>tack</sub> が接触速度を計測した後に接触速度が劇的に変化した（大きい加速度が生じた）ことが考えられる。これは、実験中参加者はゆっくりと叩く際にスティックの先端がアルミニウム箔に接触すると同時に止まるようにする傾向があり、結果として大きな加速度が生じたためと考察できる。一方で、接触速度が 0.2m/s 以上であった時、HACHIS<sub>tack</sub> は正確に接触時刻を予測することができた。1SD (Standard Deviation) が 0.5648ms, 2SD が 1.1296ms であった。本結果は接触速度が遅い時 (0.2m/s 未満) を除いて、HACHIS<sub>tack</sub> はミリ秒単位で正確に接触時刻を予測可能であることを示している。

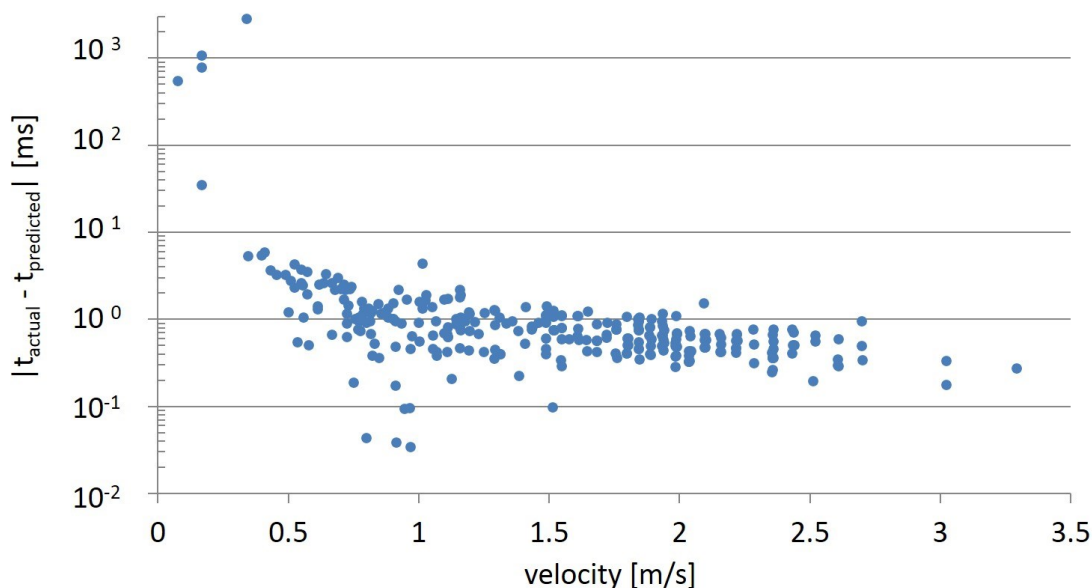


図 4-14 接触時刻予測実験結果：

x 軸および y 軸はそれぞれ接触速度および予測と実際の接触時刻の差を示す。

#### 4.1.3.5 考察

多層の接触検知モジュールによってスクリーンに対して法線方向の物体の位置を計測する手法は既に提案、開発されている[126][165]一方で、その応用は物体の三次元姿勢の計測であり、サンプリングレートも数十 sps であった。それに対し、HACHIS<sub>tack</sub> は 10ksps のサンプリングレートで物体のスクリーンへの接触速度を正確に計測することを実現した。さらに、タッピングインタラクションにおいて HACHIS<sub>tack</sub> は正確に接触時刻を予測することができ、指がスクリーンに接触していないにもかかわらず光が遮断されることで接触を誤検知してしまう迷い指誤検知をタッピング入力において解決する。

接触速度計測に関して、HACHIS<sub>tack</sub> は既存の手法（近接センサ（静電容量センサ、反射光を検知する光センサ）、加速度センサ、圧力センサ、マイクロホン等）に対して 3つの利点をもつ。一つ目は高いサンプリングレートにより接触速度を正確に計測できる点である。二つ目はスクリーンとの接触の前に接触速度を計測できる点である。特にこれらの利点は、[131]のように刺激の提示タイミングが重要である際に効果的である。三つ目は非接触での接触検知、速度計測が可能な点である。

HACHISStack は通常の光遮断方式の制約（ほこり等による光センサの誤作動，低空間解像度，光軸調整が面倒）に加えて次に挙げる制約がある。

現在の実装では多点を同時に接触検知することが困難である。解決策の一つに多点接触検知が可能である光遮断方式のタッチパネル[126]を垂直方向に積層することが挙げられる。これにより x 軸および y 軸の空間解像度も向上する一方で，取得すべき光センサの数および多点接触検知のためのソフトウェア的な処理が増えるので時間解像度が低下すると考えられる。

また一度目のタッピング入力の後，次のタッピング入力を行うためにユーザは一度指を上層の接触検知モジュールよりも上に上げなければならない。これは接触検知モジュールを薄くすることで解決できる。一方で，図 4-9 における  $d_1$  と  $d_2$  が小さくなるため，接触速度を計測および接触時刻を予測するためにリフレッシュレートをより高速にする必要がある。どれほど前に接触時刻を予測できるか ( $t_{advance}$ ) は次式で表される。

$$t_{advance} = \frac{d_2}{v} - t_{latency} \quad (6)$$

$t_{latency}$  は接触速度計測および接触時刻予測の算出にかかる時間である。例えば，接触速度  $v$  が 1m/s， $d_2$  が 3.5mm および  $t_{latency}$  が 0.1ms（現在の試作の仕様）であった場合，接触時刻は接触の 3.4ms 前に予測することが可能である。ただし， $t_{advance}$  が負の場合，接触時刻は予測できない。

実験結果が示したとおり，遅い叩き動作（0.2m/s 未満）の場合，接触時刻を正確に予測することが困難であった。最も不正確であった場合，予測と実際の接触時刻の差は数秒であった。この原因の一つに，HACHISStack は等速運動を仮定しているのに対し，遅い叩き動作の時には接触直前に大きな加速度が生じたためと考えられる。改善策として 3 層以上の接触検知モジュールを積層することで，接触加速度を計測することが挙げられる。

#### 4.1.4 アプリケーション

本項では，HACHISStack の 3 つのアプリケーション：スクリーン上での 1) 低遅延材質（ゴム，木，金属）感変調；2) キーの強弱表現が可能であるバーチャルピアノ；および 3) 触覚フィードバックをもった拡張鍵盤打楽器（木琴，鉄琴）について述べる。アプリケーションの実装にあたって，新たに大きいサイズの HACHISStack（第二試作）を制作した。図 4-15 に示すように，ワークスペースは 294×190mm，x 軸上に 24 個，y 軸上に 16 個のレーザモジュールおよびフォトランジスタより構成した。

2 つのアプリケーションは叩き動作に対する触覚フィードバック（振動提示）をもつ。接触速度計測を振動刺激の初期振幅を決定するために用いた。また接触時刻予測によって，遅延を感じさせない触覚インタラクションを実現した。

##### 4.1.4.1 タッチスクリーン上での材質感変調

図 4-16 に低遅延材質感変調のセットアップを示す。本アプリケーションは液晶スクリーン，ゲルシート，HACHISStack，HaCHIStick から構成される。スクリーン上にはゴ



ム、木、金属の3つの材質が表示されており、ゲルシートが設置されている。HaCHIStickでユーザがスクリーンを叩くと、HaCHIStickに内蔵されたアクチュエータが叩いた材質（位置）に応じた振動を提示する。また、接触速度に応じて、例えば速く叩いた場合は初期振幅の大きい振動が提示される。図 4-17 に3つの材質を異なる速さで叩いた際のアクチュエータへの印加電圧を示す。

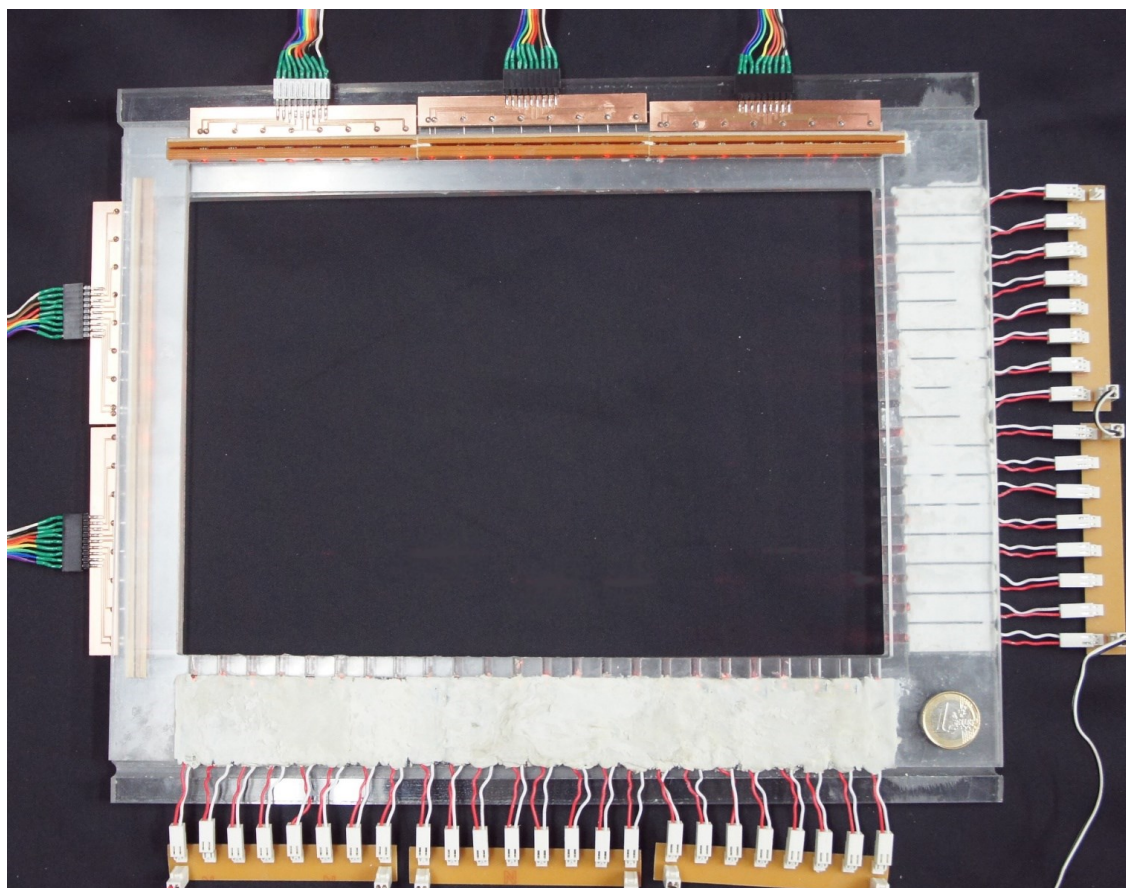


図 4-15 HACHIStick 第二試作：ワークスペースは 294×190mm. x 軸上に 24 個, y 軸上に 16 個のレーザモジュールおよびフォトトランジスタより構成される。

本アプリケーションを EuroHaptics 2012, Haptics Symposium 2014 でデモ展示した。ほぼ全ての参加者が正確に3つの材質を識別することができた。またシステムの遅延に対するユーザの主観評価に関しては、ヒトの遅延弁別能力および遅延が材質感変調に与える影響の調査を行った。詳しい検証内容については次項で述べる

#### 4.1.4.2 キーの強弱表現が可能なバーチャルピアノ

材質感変調以外の HACHIStick のアプリケーションとして、キーの強弱表現が可能なバーチャルピアノを実装した。図 4-18 に示すように本アプリケーションは液晶スクリーン、HACHIStick、Musical Instrument Digital Interface (MIDI) 音源およびスピーカから構成される。ユーザのスクリーンへのタッピング入力に応じて、キーとペロシティが MIDI 音源へ送信される。既存のタッチスクリーン上での楽器演奏アプリケーションと

は異なり，ユーザは打鍵速度によってキーの強弱表現が可能である．また，高速なサンプリングレートおよび接触時刻予測によって低遅延での音提示が可能である．

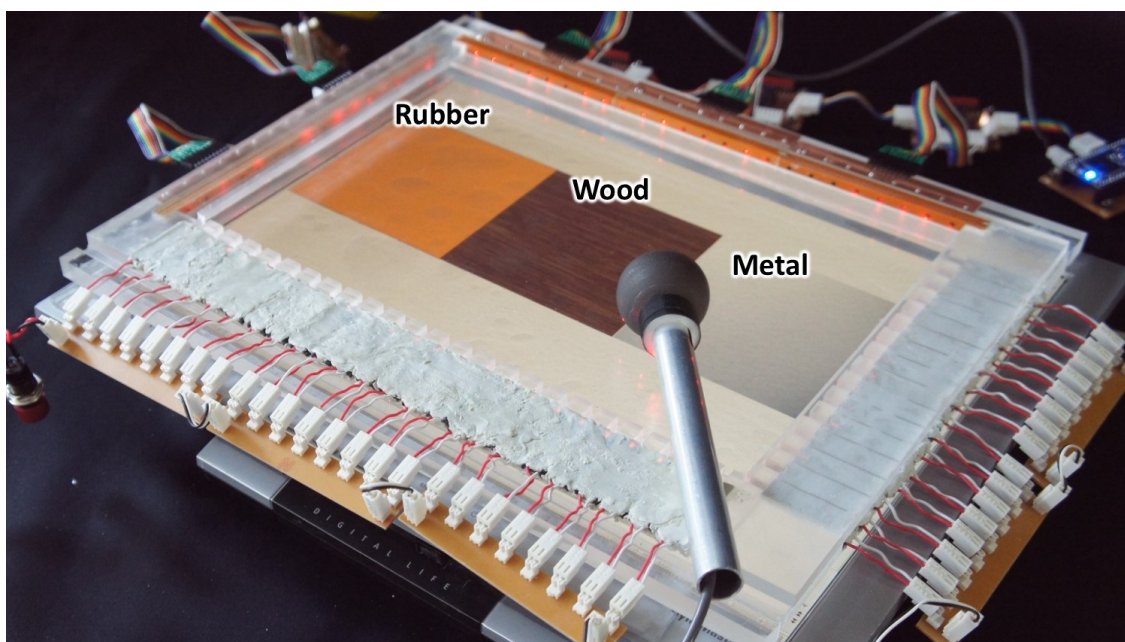


図 4-16 タッチスクリーン上での材質感変調：液晶スクリーン上にはゴム，木，金属が表示されており，ゲルシートが設置されている．HaCHIStick でスクリーンを叩くと叩いた材質に応じて内蔵されたアクチュエータより減衰正弦波が提示される

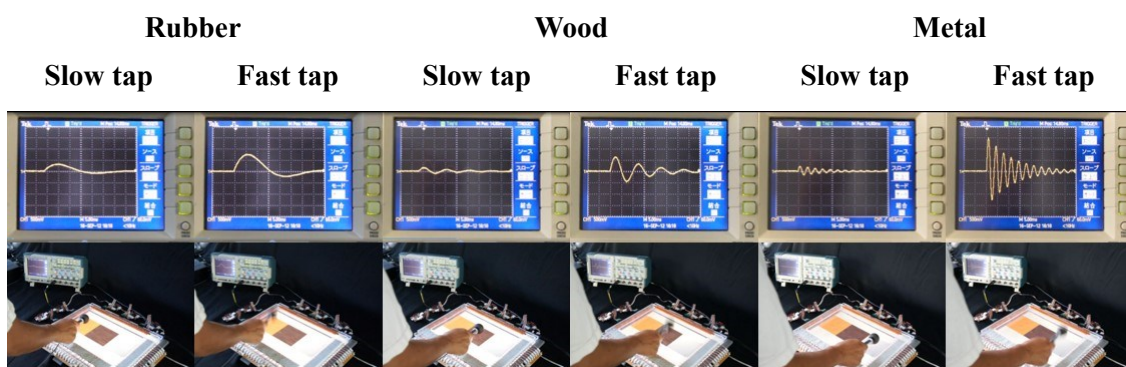


図 4-17 3つの材質（ゴム，木，金属）を異なる速さ（遅い，速い）で叩いた際にアクチュエータに印加される電圧

#### 4.1.4.3 触覚フィードバックをもった拡張鍵盤打楽器

3つ目のアプリケーションとして，前2つの触覚提示および聴覚提示を組み合わせた拡張鍵盤打楽器を実装した（図 4-19）．本アプリケーションは液晶スクリーン，ゲルシート，HACHIStick，HaCHIStick，MIDI 音源およびスピーカから構成される．スクリーン上には 1 オクターブ分の木琴と鉄琴が表示されており，ゲルシートが設置されてい

る。ユーザはスクリーンを HaCHIStick で叩くことで、楽器に応じた触覚的な材質感および音色といった楽器演奏の経験をバーチャルに体験できる。

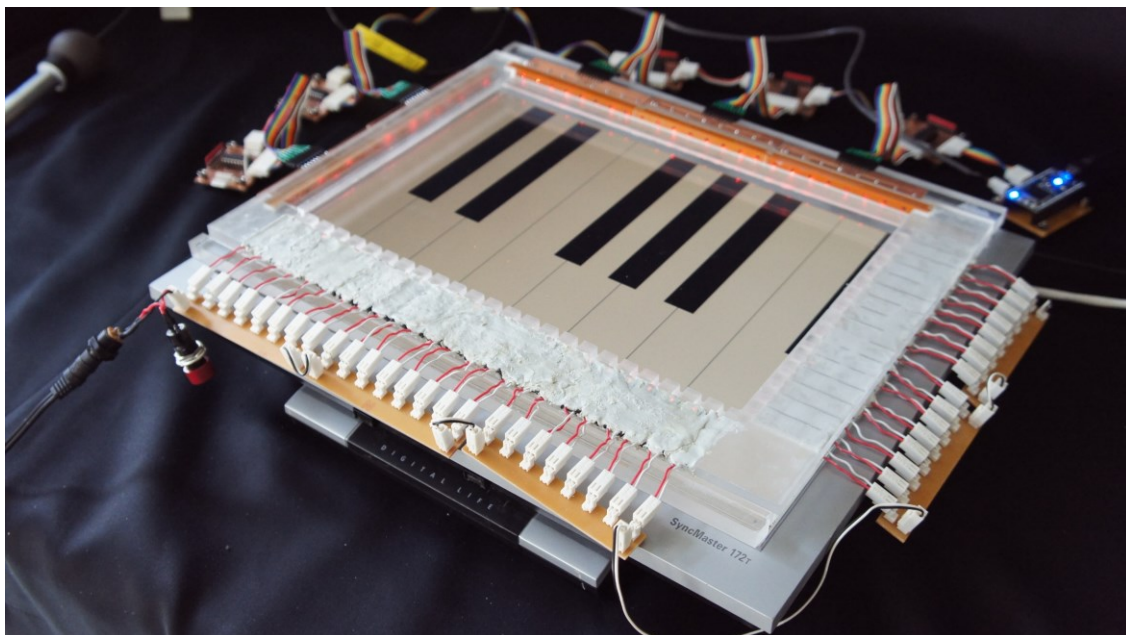


図 4-18 キー強弱表現が打鍵速度によって制御可能なバーチャルピアノ

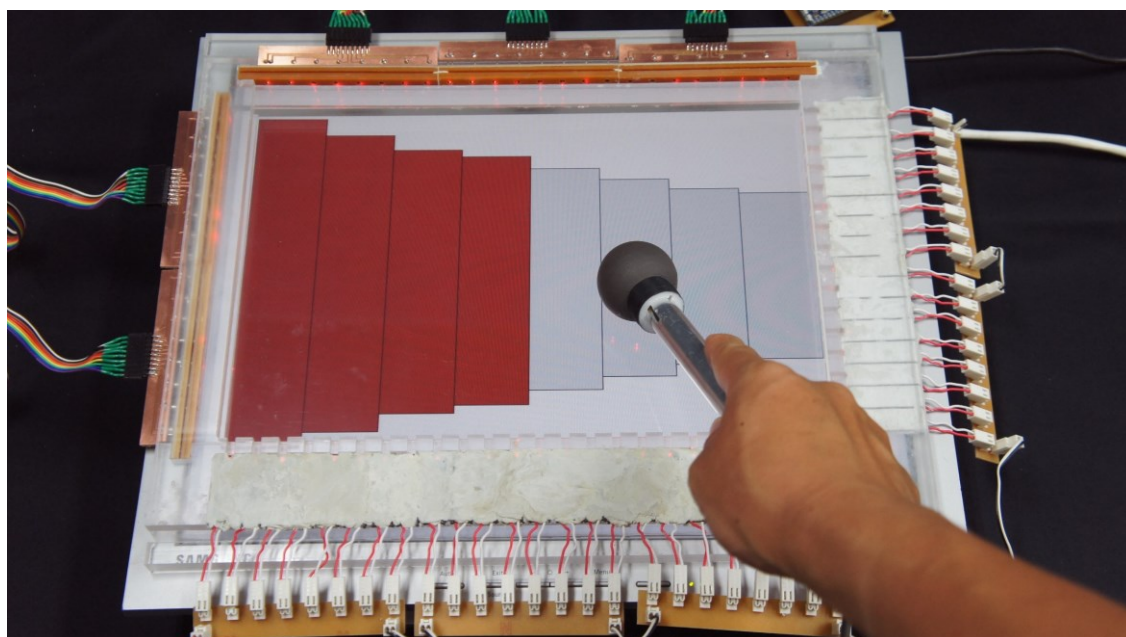


図 4-19 触覚フィードバックをもった拡張鍵盤打楽器：液晶スクリーンには1オクターブの木琴および鉄琴が表示されている。打鍵時に生じる触覚的な材質感を提示する。

### 4.1.5 振動提示の遅延が材質感変調に及ぼす影響

本項では前項で実装したタッチスクリーン上での材質感変調システムを用いて、叩き動作に対する振動提示の遅延が材質感変調に及ぼす影響の調査を行う。具体的には心理物理実験より、接触検知からアクチュエータ駆動までにどれほどの遅延が生じるとユーザは振動提示に遅延があると感じるかという遅延検知閾を計測する。

#### 4.1.5.1 先行研究

主に HCI の研究分野でタッチスクリーン上での入力に対するフィードバック遅延に関する研究が行われている。Ng らは低遅延タッチスクリーンを開発し、ユーザの入力（タップ、ドラッグ等）に対する視覚提示（ポインタの表示、移動等）の遅延の検知閾を調べた[74][112][113]。遅延検知閾は入力様式に依存し、数ミリ秒から数十ミリ秒の遅延があるとユーザは視覚提示が遅れていると感じ、タッチインタラクションにおいて低遅延を好むことを報告している。Kaaresoja らはタイピングに対する振動提示の遅延が及ぼす影響について調査した[78]。被験者実験の結果、振動提示に 100ms ほどの遅延が生じた場合でも入力の効率に影響は見られなかった一方で、ユーザの主観的な使いやすさが減退したことを報告した。このように、入力に対するフィードバックの遅延は使いやすさや使い心地といったタッチスクリーン上でのインタラクションの質を低下させる。

遠隔作業や触覚研究分野で、運動に対する触覚提示の遅延が及ぼす影響について調査されている。Hikichi らは遠隔協調作業において触覚提示に遅延が生じると作業効率が低下することを報告している[57]。Rank らは運動の強度（運動距離、速度）が大きいほど触覚提示の遅延検知閾が低下することを報告している[143]。これらの研究では、インタラクションの種類やシステムに依存するが、ユーザの許容できる遅延もしくは遅延検知閾は数十ミリ秒であることを被験者実験より明らかにしている。

また遅延は提示する触覚に影響を与えることが知られている。Ohnishi らは押し動作に対する反力提示に数ミリ秒の遅延を加えた際、ユーザは実際に提示された硬さよりも柔らかく感じることを報告している[131]。Okamoto らは平面探索時の振動提示にユーザが検知できないほどの遅延を提示した際、粘性感が生じることを報告している[133]。

このように触覚提示の遅延に関して、作業に支障をきたさない許容可能な遅延の閾値、触覚提示に遅延があると感じられる閾値が調査されてきた。また遅延によって提示した触覚とはことなる感触が生起することについても報告されてきた。

#### 4.1.5.2 叩き動作に対する振動提示の遅延が及ぼす影響の検証実験

本実験は、叩き動作に対する振動提示において、遅延があると感じられる遅延検知閾の定量的計測および遅延が材質感変調に及ぼす影響を調査することを目的とする。

#### セットアップ

本実験で用いたシステムはマイクロコントローラ（mbed NCP LPC 1768, NCP Semiconductors）より制御した。本システムは HaCHIStick, タッチスクリーンおよび PC から構成された。PC は実験中の各試行の実験パラメータを設定するために用いた。本システムでは接触検知から振動子駆動までを 0.1ms の遅延で行うことができた。

図 4-20 に本実験で用いた HaCHIStick (第二試作) を示す. 本スティックの柄の部分  
はアルミニウム角パイプ, ヘッド部分は ABS 樹脂であり, スティックの全長は 170mm,  
重量は 50g であり, 第一試作より軽量であった. スティックのヘッド部分に導電塗料を  
塗布し, マイクロコントローラの Vcc 電源 (3.3V) に接続した. 振動子には第一試作よ  
りも大きい加速度が提示できるボイスコイル型リニアアクチュエータ (Haptuator MkII,  
Tactile Labs) を用い, マイクロコントローラからの D/A 出力をより出力の大きいオーデ  
ィオアンプ (AA-AB32186, Sure Electronics, 150W 出力) によって増幅し駆動した.

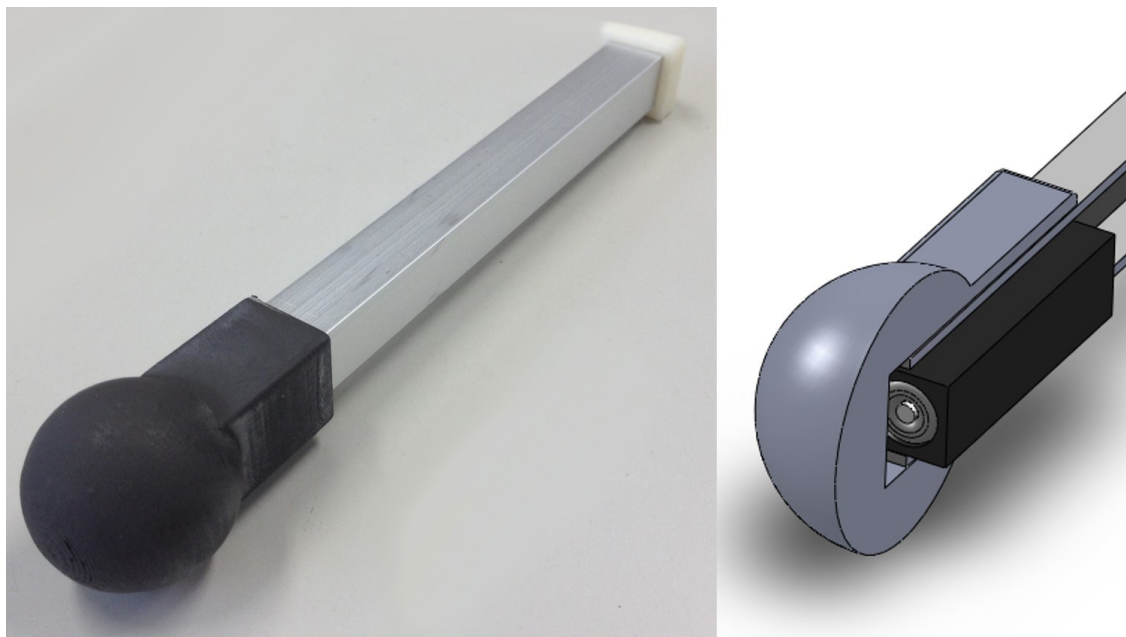


図 4-20 HaCHIStick 第二試作 : 左) 装置の外観 (170mm, 50g),  
右) 内部構造 (ボイスコイル型リニアアクチュエータを内蔵)

図 4-21 に本実験で用いたタッチスクリーンを示す. 本タッチスクリーンは  
HACHISstack 第三試作 (ワークスペース 200×200mm, x 軸上に 8 個, y 軸上に 8 個の赤  
外線 LED およびフォトトランジスタより構成), 透明電極 (200×100mm), ゲルシート  
および液晶ディスプレイから構成された. HACHISstack 接触位置および接触速度を計測  
した. 透明電極は厚さ 0.03mm の単一電極であり, マイクロコントローラの I/O ポート  
およびプルダウン抵抗を介してグラウンドに接続された. 透明電極にヘッド部分が接触  
すると I/O ポートの電圧レベルが low から high になることを利用して接触検知を行っ  
た. なお, HACHISstack のみでも接触タイミングを予測することが可能であるが, ホン  
実験では厳密に接触タイミングを検知する必要があったため 4.1.2.3 の実験と同様の方  
式で接触検知を正確に行った. ゲルシート (スチレン系エストラマ) は液晶ディスプレ  
イとスティックのヘッド部分が接触することで生じる高周波振動を吸収するために用  
いた. 液晶ディスプレイ (SyncMaster172T, Samsung) には被験者への指示が表示され  
た.

#### 適応上下法

本実験では振動提示の遅延検知閾を計測するために適応上下法を用いた. 本実験で用  
いた上下法は重み付け上下法[79]を改変したものであり, 75%遅延検知閾を計測できる.

本実験では2対の刺激（標準刺激（遅延 0.1ms）と比較刺激（遅延 0.1 から 25.6ms））を提示し、被験者は遅延がないと感じる刺激を選択した。被験者が標準刺激を選択した場合を正答とし、比較刺激を選択した場合を不正答とした。正答の場合は比較刺激の遅延を1ステップ分減少させ、不正答の場合は3ステップ分増大させた。ステップの初期値は6.4msであった。被験者の回答の傾向が逆転する時（正答から不正答、もしくは不正答から正答）を折り返しと定義した。折り返しの際には、ステップを半減し、最小で0.1msまで減少させた。8回目の折り返しが生じた時点で計測を終了し、その直前の試行での比較刺激の遅延を75%遅延検知閾とした。比較刺激の遅延が0.1msから開始される上昇系列と25.6msから開始される下降系列の計測を設定した。本実験で得られる結果は厳密には遅延検知閾ではなく標準刺激（0.1ms）との弁別閾である。

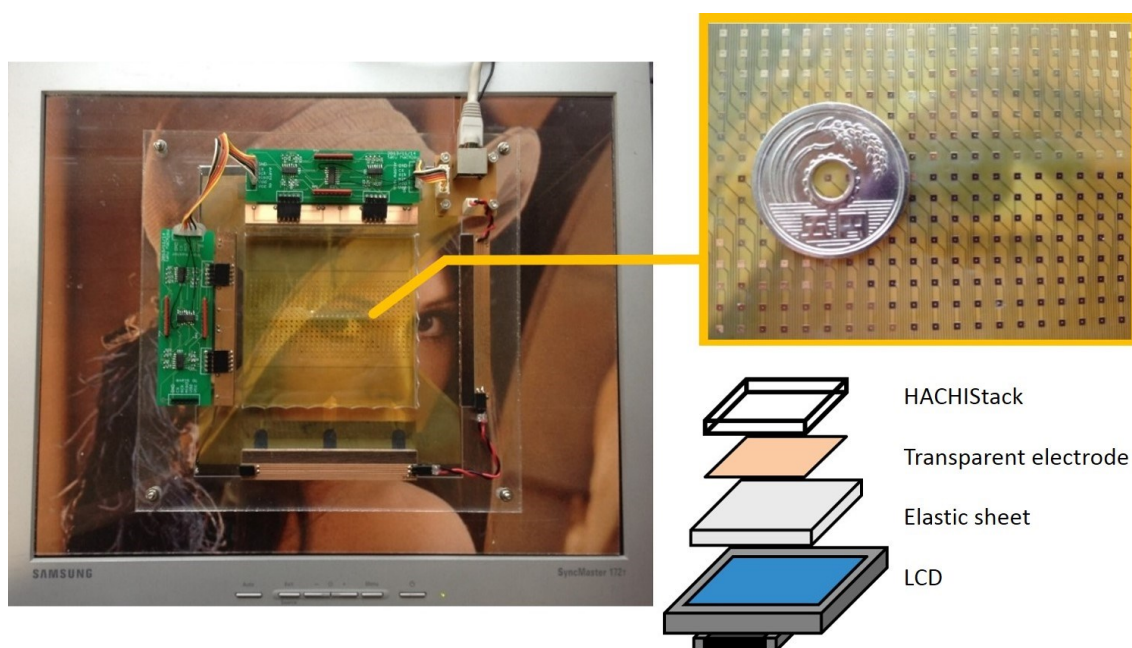


図 4-21 実験で使したタッチスクリーンの構成

### 実験条件

本実験では材質感振動提示として木条件と金属条件を用いた。式(1)の減衰正弦波のそれぞれの材質のパラメータは Okamura らのモデル[134]を参考に決定した（表 4-4）。ただし、振幅に関しては、システムの制約上、[134]よりも小さい値に設定した。

表 4-4 減衰正弦波のパラメータ

	$A [s^{-1}]$	$B [s^{-1}]$	$f [Hz]$
Wood	-9.9	80	100
Metal	-19.8	90	300

### 実験手続き

まず被験者はタッチスクリーンの前に着席し、実験者より実験の内容について説明を受けた。スティックの叩き方に関して、スティックのヘッド部分がタッチスクリーンに

触れた後、直ちにヘッド部分を上げるように、かつ接触速度が 100 から 500mm/s の間になるように叩くように指示され、練習を行った。次にホワイトノイズが提示されたヘッドホンを装着し、聴覚を遮断した。そして割り振られた材質感条件において上下法による計測を 8 回（上昇系列 4 回，下降系列 4 回）行った。全計測終了後にアンケートに回答して実験を終了した。

本実験には 12 名（男性 10 名，女性 2 名；22 から 24 歳）が参加した。被験者 A から F は木条件で，被験者 G から L は金属条件で実験を行った。

### 実験結果・考察

本実験結果を図 4-22 に示す。木条件における振動提示の 75%遅延検知閾は 2.4 から 8.8ms であり平均（標準偏差）は 4.7(±2.5)ms，金属条件においては 2.5 から 16.4ms であり平均（標準偏差）は 6.8(±4.8)ms であった。それぞれの 75%遅延検知閾の平均値に対して Student の t 検定（対応なし）を行ったところ，有意差は認められなかった ( $t(10)=-0.9629$ ,  $p=0.3583$ )。

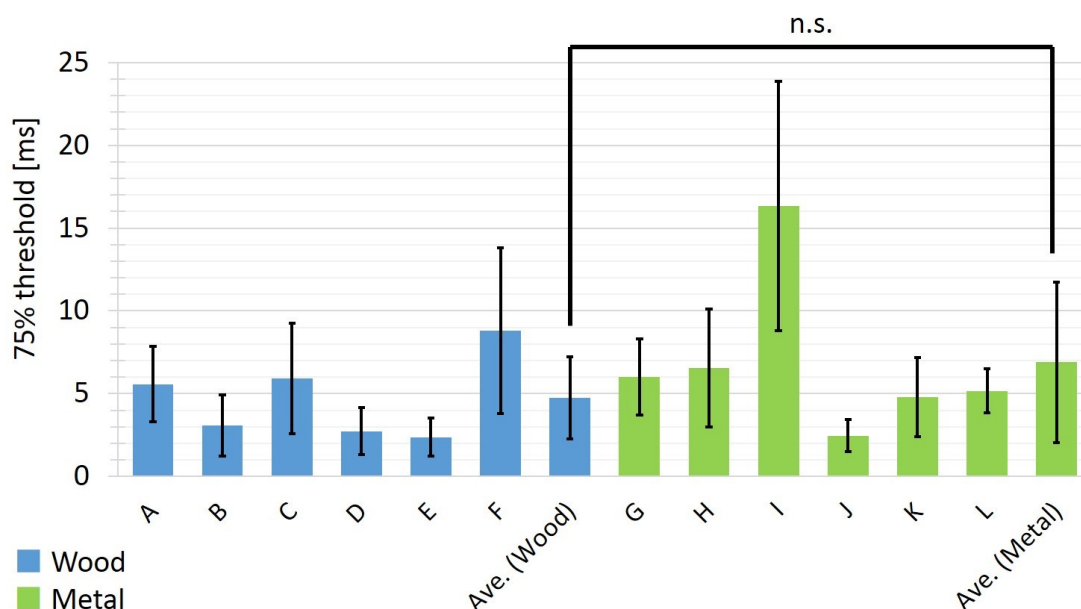


図 4-22 実験結果：左) 木条件，右) 金属条件。

アンケートの回答より遅延が材質感変調に及ぼす影響について観察することができた。材質感の条件を問わず，大半の被験者が振動提示を感じにくい方を遅延がないと判断する戦略をとっていた。一方で遅延がない場合は叩いている対象が硬く感じるとの報告もあり，Ohnishi らの報告[131]と同様の傾向が見られた。また，遅延のある方に関しては，「叩いた後にも振動が続く感じがした」，「遅延があると跳ね上がるように感じた」あるいは「遅延があるとめり込むような感じがした」との報告があった。

本実験結果ではユーザは平均で 5.8ms の遅延を検知可能であることが明らかとなった。Ng らの報告によると，市販のタブレット PC 等のタッチスクリーンはタッチ入力からカーソルの表示等の視覚フィードバックまでに 50 から 200ms の遅延が生じる[112]。また現在モバイル端末で振動提示に広く用いられている偏心モータは電圧を印可して

から振動振幅が最大になるまでに数十から数百ミリ秒の遅延が生じる。したがって、現在普及しているタッチスクリーンシステムではタッチ入力から振動振幅が最大になるまで数百ミリ秒の遅延が生じると考えられる。タイピング入力に対する振動提示の遅延においては 100ms 程度であれば入力効率に影響はないとの報告がある[78]一方で、使いやすさや使い心地を向上するために、またよりリアリスティックな触覚インタラクションを実現するためには遅延を低減させる設計が必要であるといえる。

本実験結果からは提示する材質感による遅延検知閾への影響は見られなかった。しかし、本実験で使用した振動周波数は 100Hz および 300Hz であり、触覚的には高周波で振動振幅が最大になるまでにかかる時間（立ち上がり時間）は数ミリ秒であった。より低い周波数の振動刺激を用いた場合、立ち上がり時間が数十から数百ミリ秒となることから、遅延検知閾は大きくなる可能性がある。また、周波数が 100Hz および 300Hz の振動刺激は FA-I と FA-II の両方で受容される（第 2 章参照）。一方で、例えばゴムを提示する振動周波数は 30Hz であり、FA-I のみで受容される。この受容器的な違いによっても低周波振動での遅延検知閾は本実験結果と異なる可能性があると考えられる。

遅延がない場合に振動を感じにくいという回答に関して、標準刺激（遅延 0.1ms）においては自然な材質感変調ができていたためと考えられる。実験終了後に、一部の被験者に振動を提示した場合と振動を提示しない場合を叩き比べさせたところ、被験者は振動の存在に気づき、振動によってスクリーンの材質が変わったように感じると回答した。これまでも本システムによる材質感変調をデモ展示した際に、ユーザは振動のあり・なしを比較する、あるいは異なる材質感を比較することで材質の違いを感じられることがしばしばあった。つまり、ユーザは相対的に評価することで初めて振動提示の意図（材質感、低遅延）が分かると考えられる。したがって、ボタンの押下に対するフィードバック等、入力に対する応答が記号的である方が好ましい場合や振動の効果を強調させる必要がある場合においては振動提示にあえて遅延を加える設計も実用的であり、また実感性を強調できると考えられる。

遅延が触覚提示の物性に及ぼす影響に関して、Ohnishi らの報告[131]と同様に、遅延のない方が対象を硬く感じるとの報告があった。また、スティックの跳ね上がりやめり込みといったようにスティックの接触後の挙動の違いに関する報告もあった。これは遅れて提示された振動刺激の立ち上がりの方向が関与すると考えられる。振動刺激の立ち上がりがスクリーンと反対方向であればスティックが跳ね上がるように感じ、反対にスクリーンの方向であればめり込むように感じると考えられる。

#### 4.1.6 まとめ

本研究では、叩き動作に応じたタッチスクリーンの材質感変調手法を考案し、それを実現するための振動提示スティック HaCHIStick とタッチパネル HACHISack の設計・開発を行った。HaCHIStick は高い応答性と階調性を兼ね備えた振動提示可能なスティック型の装置である。HACHISack は光遮断方式を応用した高い応答性、接触速度計測および接触時刻予想が可能なタッチパネルである。これら 2 つを組み合わせることで、スクリーンに触れた瞬間に減衰正弦波振動提示することを実現し、タッチスクリーンの材質感変調を実現した。また振動提示の遅延検知閾を計測した被験者実験では、遅延検知閾が約 6ms であることを示し、従来のタッチスクリーンシステムで生じる遅延より



も小さいことを示した。さらに、遅延が材質感知覚に及ぼす影響を調査し、従来のゴム、木、金属の3つの材質に加えて、遅延を加えることで柔らかさ感やめり込み、跳ね返り感を提示可能であることを示した。以上より、本手法によってタッチスクリーンの材質感変調が実現できることを示した。

本研究は、タッチスクリーン上での触覚インタラクションの質を向上させるという背景のもと叩き動作に対して触覚提示することでタッチスクリーンの材質感を変調することを目的に行われた。これに対し、スクリーンを叩いた瞬間を検知し、叩いた際に生じる振動を変調して提示することで、実際にスクリーンの材質を変えることなく材質感を変調するシステム HaCHIStick と HACHISStack を実装した。これは実際に生じる振動に操作を加え変調したといえる。

本研究では特に叩いた瞬間を検知して、瞬時に振動提示を行うといった応答性を重視した。本研究の初期段階で市販のタブレット PC (Creative Technogoy Ltd., Ziiio 10”) を用いて接触検知および振動提示するシステムを試作したところ、ユーザはシステムの遅延により叩き動作と振動提示が一致しないと感じ、材質感が変わったように感じなかった。これは 4.1.5 項で検証したとおり、ユーザの叩き動作に対する振動提示の遅延検知閾がタブレット PC の遅延よりも小さいためである。一方で、HaCHIStick と HACHISStack によるシステムにおいては、ユーザが遅延を感じることもない実感性のある材質感変調が実現できた。

以上より、本研究は誇張表現のうち変調モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発であったといえる。また、特に高い応答性を実現することで実感性のある材質感変調が実現できたと結論づけられる。

## 4.2 拡張歯ブラシ: 歯磨き動作に応じた歯磨き音変調による歯磨き感の拡張

本節では歯磨き音を変調して提示することで歯磨きの快感および達成感を増強する拡張歯ブラシの設計・開発について述べる。羊皮紙錯覚（手を擦った際に生じる音の高周波成分を強調すると手のひらが乾いた紙のように感じられる）を利用して汚れている、美化されているといった歯の状態を疑似的に再現し、歯磨きの体験を拡張する。

### 4.2.1 研究背景

歯磨きは口腔内衛生の保持および虫歯・歯周病予防のために行われる。これらの目的を達成するために、歯磨きは日常にかつ正しく行われる必要がある。しかし、歯磨きはしばしば正しく行われなかったり、単調作業ゆえに飽きられて忘れられたりする傾向にある。この原因として次の2点が考えられる。一点目はモチベーションの欠如である。歯磨きは単調作業であるため、そこから達成感を感じる事が難しい。さらに歯磨きが、例えば虫歯になって初めて歯磨きの効果を実感できるという、負の報酬のみを提供していることもモチベーションの欠如の原因である。二点目は、十分でない磨き時間や力の加えすぎ等、誤った方法による歯磨きである。誤った方法による歯磨きは効果がないだけでなく、逆効果となる恐れもある。例えば力の加えすぎは歯茎に損傷を与える。しかし、一般的に正しい歯磨きを教示することは難しい。

そこで本節では、新たな歯磨きに対するフィードバック手法としてクロスモーダル効果を利用した歯磨きの印象（快・不快感、達成感）の制御を試みる。本手法は歯磨きのモチベーション向上や、正しい歯磨きに対してはポジティブな印象を提示し、誤った歯磨きに対してはネガティブな印象を提示するといった歯磨きの教示への応用に期待できる。

本節はまず、歯磨きに対するフィードバック手法の先行研究を紹介し、フィードバックの質を向上させるための設計要件を設定する。次に、口腔内での感覚提示手法に関する先行研究について述べる。そして、本手法の詳細および実装について述べ、2つの被験者実験よりその効果の検証を行う。

### 4.2.2 先行研究

#### 4.2.2.1 歯磨きに対するフィードバック

歯磨きが怠られる原因の一つは負の報酬によるモチベーションの欠如である。したがって、歯磨きに対して積極的な報酬を提示することでモチベーションが向上できると考えられる。Nakajimaらは、ユーザが歯を磨くことでモニタ内の熱帯魚が活動的になるというバーチャル水族館を開発した[107]。歯ブラシには加速度センサが内蔵されており、歯磨きの頻度を計測する。森本と宮下は歯ブラシをスマートホンに固定し、加速度センサによって検出されるストローク回数を遠隔地にいるユーザ同士が競い合うゲームHAMIGAKI-K.O.を開発した[129]。また商品レベルでも、歯磨きに内蔵された圧力センサが歯とブラシの接触を検知し、接触時のみ音楽クリップが再生されるといった Tooth Tunes が販売されている[4]。このように、歯磨きにエンタテインメント性を付加するこ

とで積極的な報酬を実現し、ユーザの歯磨きに対するモチベーション向上が試みられている。

またユーザに正しい歯磨きを教示する手法も歯ブラシも存在する。Oral-B 社の SmartGuide シリーズでは歯を上下左右に 4 分割して LCD 画面上に表示し、ユーザに該当の部分を磨いた時間と磨くべき時間を提示する[135]。また歯ブラシ内部に搭載された圧力センサにより歯ブラシの過度な押しつけを検出し、ビープ音によって警告する。Chang らは子供の歯磨き学習を支援する Playful Toothbrush を開発した[23]。Playful Toothbrush では、カメラビジョンを用いた高精度な歯ブラシのトラッキングにより子供の歯磨き動作を検出し、モニターとスピーカから報酬のアニメーションや効果音を提示することで正しい歯磨きを教示するとともに、子供の歯ブラシに対するモチベーションを向上させた。

これらの先行研究・商品は先に挙げた二つの問題の解決に貢献しているといえる。一方で、これまでの報酬のフィードバック方法はアニメーションや効果音のように実際の歯磨きの体験とかけ離れているものであった。このためユーザはフィードバックされた情報の意味を解釈する必要がある。また、エンタテインメント性の付加は本来の歯磨きの目的である歯の美化を意識させるものとしては不十分である。以上より、歯磨きに対するモチベーションを向上させる新たな直感的かつ歯の美化を意識させるフィードバックを実現するために次の 2 つのコンセプトを設定した。

1. 通常の歯磨きの体験の拡張
2. ユーザの歯磨きに対するモチベーションが向上するような感覚変調の設計

1 に関して、歯磨き時にはブラシと歯の間で生じる振動や音を触覚的、聴覚的に知覚する。この本来生じる触覚的、聴覚的な感覚（以後、歯磨き感とする）を変調し歯磨きに対するフィードバックとして用いることで直感性が保証されると考えた。2 に関して、例えば感覚変調によってユーザが自身の歯が徐々に美化されていく過程をはっきりと把握できるようになれば、その過程自体が積極的な報酬となりユーザのモチベーション向上に貢献すると考えられる。

#### 4.2.2.2 口腔内での感覚提示

歯磨きの体験は主に触覚と聴覚から構成されるため、これら 2 つの口腔内の感覚提示手法に関する先行研究について述べる。歯磨き粉等によって嗅覚や味覚が刺激されることもあるが、これらの感覚提示は時間軸での動的な制御に向かず、2 つ目のコンセプトを満たさないため本研究では考慮しない。

歯[71]や舌[164]に力を提示する口腔内固有受容感覚提示装置が開発されている。例えば、Iwata らの Food Simulator では、1 自由度の力提示装置より咀嚼に対して力提示することで食べ物の食感を再現する[71]。しかし、歯磨き時にユーザの歯に力提示することを想定した場合、高自由度な力提示装置が必要となるため、力提示装置の利用は実用的であるとはいえない。

また、歯への直接の触覚提示ではないが、口腔内で電気刺激[108]や振動刺激[53][188]することで食事を再現、拡張する手法が開発されている。例えば、Hashimoto らはユー

ザのストローの吸引動作に応じて振動を提示することで様々な物体を吸引する感覚を再現した[53]。しかし歯磨き時に新たに振動を提示することを想定した場合、歯を磨いた際に生じる本来の振動により提示刺激がマスキングされてしまうと考えられる。これらのことから直接歯磨き時の触覚的体験を変調することは困難であると考えられる。

Zampini と Spence は咀嚼音の音量レベルを上げるもしくは高周波成分を強調することで、ポテトチップスが硬くかつ新鮮に感じられることを発見した[195]。この効果は聴覚による疑似触覚提示の一種であるといえる。さらに Koizumi らにはこの効果を利用、拡張して咀嚼時の食物の触感を変調する *Chewing Jockey* を開発した[83]。これらの手法は口腔内の感覚変調を実現しており、かつマイクロホンとヘッドホンといった簡易なオーディオインタフェースで実装できるという点で実践的であるといえる。さらにクロスモーダル研究の分野では、触探索時に生じる音の変調が触覚に影響を及ぼすことが知られている[47][77][98]。例えば、Jousmäki と Hari は両手を擦る際に生じる摩擦音にハイパスフィルタを適用もしくは音量レベルを上げて擦る動作に同期させて提示すると手のひらが紙のように滑らかかつ乾燥したように感じる羊皮紙錯覚を報告している[77]。こうした聴覚による疑似触覚提示は口腔内で生じる音を変調することで生じる。

Zampini らは電動歯ブラシの駆動音が歯磨きの印象に及ぼす影響を調査した[194]。彼らは振動モータの駆動音の音圧を下げる、もしくは高周波成分を低減することでユーザが、歯がなめらかになったかのように感じ、快感を覚えることを報告している。この結果は Jousmäki と Hari の報告[77]とは異なる傾向であった。この相違の理由として、変調した音源の違い（ヒトが発した音と機械が発した音）が考えられる。いずれにせよ、この先行研究は歯磨きの印象を制御することにおいて、歯磨き音の周波数変調が有効であることを示唆している。

### 4.2.3 拡張歯ブラシ

先行研究を踏まえ本節では、歯磨き音の周波数変調により歯磨きの体験を拡張することを試みる。本手法は歯ブラシにマイクロホンを内蔵し、取得された音声信号に音響フィルタを適用後、ユーザに提示することで実現できる。[77]より、触探索時に生じる音の低周波成分の増幅は湿り感・粘性感および粗さ感を生起することが知られている。これを歯磨きに適用した場合、ユーザは歯が磨けていない印象を受け不快感を覚えると考えられる（図 4-22-i）。一方で、高周波成分の増幅は乾き感および滑らかな感覚を生起することが知られている。これを適用した場合、ユーザは歯が磨けた印象を覚え快感を覚えると考えられる（図 4-22-ii）。

さらに、本手法によって歯磨き時の快・不快感の操作が可能になれば、直感的にユーザに歯の状態（磨けていない／磨けている）を提示可能になると考えられる。本手法は歯磨き時に生じる音を変調しているので、通常の歯磨きの体験を拡張するという前項で述べた一つ目のコンセプトを満たす。さらに、歯磨き音変調によってユーザは自身の歯が美化される過程を把握できるので、歯を磨けた印象（以後、達成感とする）を増強することが可能であると考えられる。したがって、二つ目のコンセプトであるモチベーションの向上が実現可能であると考えられる。また、[23]のような歯ブラシトラッキングシステムと本手法を組み合わせることで、各々の歯の状態を提示することが可能であると考えられる。トラッキングシステムによって各歯の表面に対するストローク回数を計

測し (図 4-23-i), その回数に応じて歯磨き音の周波数変調を行い快・不快感を提示することで直感的に歯の状態を提示できると考えられる. 図 4-23-ii では, 例として歯磨き音にバンドパスフィルタを適用した場合を示しており, 任意の面に対するストローク回数が増えるほどピーク周波数が高くなることを示している. 例えば, Surface2 や Surface4 のように十分に磨かれている場合は高周波成分が提示され, ユーザは快感を覚える. 逆に Surface1 や Surface3 のようにあまり磨かれていない場合は低周波成分が提示され, ユーザは不快感を覚える. これにより, ユーザはどの歯を十分に磨いたか, あるいは磨きが不十分であるかを直感的に把握することが可能になると考えられる.

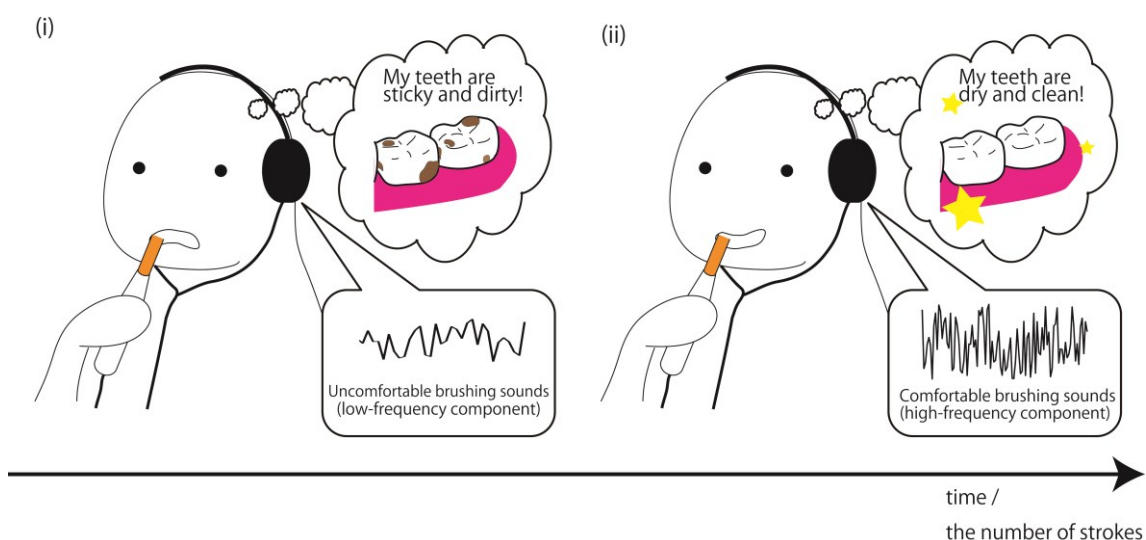


図 4-24 歯磨き音の周波数変調による歯磨き感の拡張手法

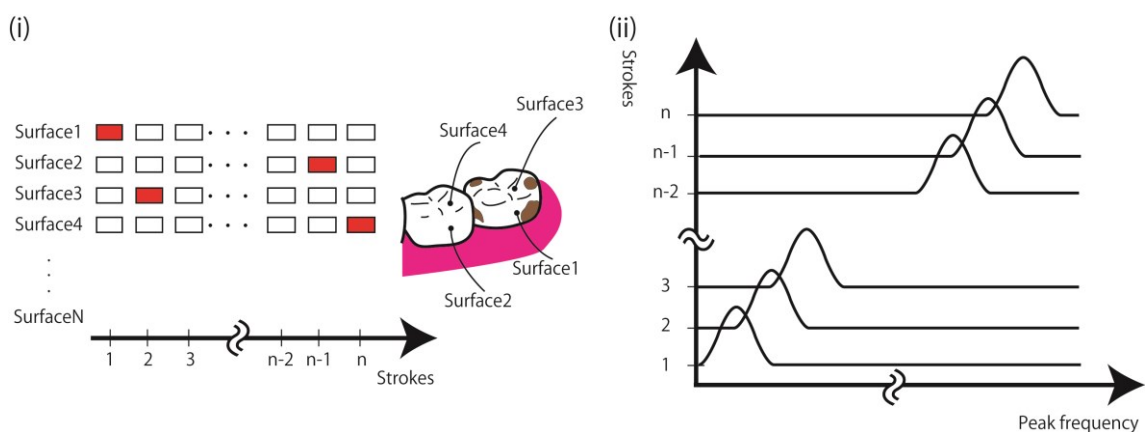


図 4-23 歯ブラシトラッキングシステムとの組合せ:

- (i) 各々歯の表面に対するストローク回数を計測.
- (ii) ストローク回数に応じてバンドパスフィルタのピーク周波数を決定.

## 4.2.4 実験 1：歯磨き音の周波数変調の効果検証

本実験では歯磨き音の周波数変調が歯磨きの快・不快感および達成感に与える効果について検証する。

### 4.2.4.1 セットアップ

実験で使用した歯ブラシを図 4-25-a に示す。ブラシ部には衛生面を配慮して電動歯ブラシ用の替えブラシ (アジアネットワークス, キセカエブラシ, 図 4-25-b) を用いた。歯ブラシの全長は 160mm, 重さは 20g であった。図 4-25-c に歯ブラシの把持部の内部構造を示す。歯ブラシの把持部は ABS 樹脂で作られており, 歯磨き音録音用のマイクロホン (パナソニック, WM-61A, 小型コンデンサマイク) および把持力計測用の力センサ (共和電業, LMA-A-5N, 小型ロードセル) を内蔵した。マイクロホンは替えブラシに直結する芯に固定した。力センサは把持部のグリップの下に固定した。

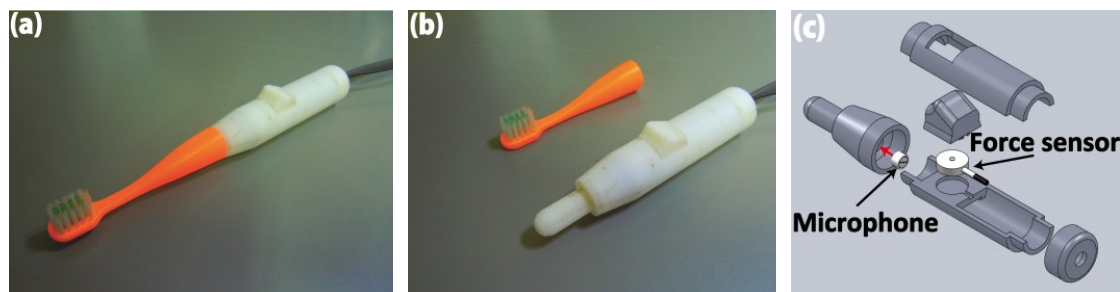


図 4-25 実験で使用した歯ブラシ

マイクロホンが取得した音声信号は PC に送信された。力センサからの信号はマイクロコントローラ (Arduino, Arduino Duemilanove) を介して PC に送信された。これら 2 つの信号は次に述べる音声処理の際に使用された。

本実験では音声処理に Max (Cycling '74, バージョン 6.0) を用いた。歯磨き音の周波数変調には, 事前にハイパスフィルタ, ローパスフィルタおよびバンドパスフィルタを比較した予備実験より, より幅広い感覚を提示可能であったバンドパスフィルタを採用した。バンドパスフィルタのピーク周波数として 5 条件 (500, 1000, 2000, 4000 および 8000 Hz, それぞれ  $Q=1.0$ ) を設定した。また音響フィルタを適用しないフィルタなし条件を対照条件として設定した。

本実験では音量レベルとして 3 条件 (-20, 0, +20 dB) を設定した。また対照条件 (フィルタなし, 0 dB 条件) の音圧レベルを騒音計 (佐藤商事, TM-102) によって 75 dB(A) になるように調整した。その他の条件では Max が示す音量レベルより調整した。

また被験者が歯磨き時に歯ブラシに加える力の大きさが快・不快感および達成感に影響を与えると考えられる。この影響を除外するために, 被験者の把持力が 20 N を超えた場合, ビープ音 (1000Hz の正弦波) が提示されるようにした。

図 4-26 に示すように, 被験者は机の前, シンクの隣のいすに腰を掛け, ヘッドホン (Direct Sound Headphone, EX-29) を装着した。机の上には歯ブラシ, モニタ, テンキー, 水の入った紙コップおよびポテトチップスが置かれていた。

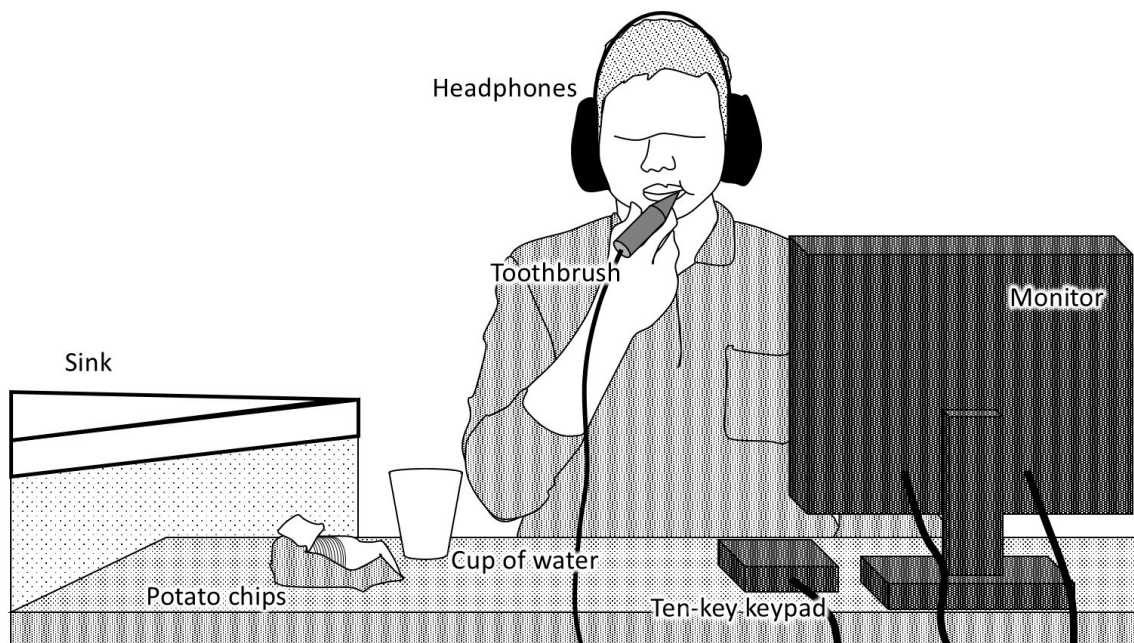


図 4-26 セットアップ

#### 4.2.4.2 実験手続き

被験者は本実験での歯の磨き方について指示された。まず被験者は右手の親指をグリップの上に置き、ペンを握るように歯ブラシを把持した。この時、歯ブラシを強く握る（把持力が 20 N を超える）とビーブ音が鳴ることを指示され、ビーブ音が鳴らないように軽く把持した。そして上あごの左側の奥歯 2 つのほほ側（上顎左側第 2・3 大臼歯の頬側）を 5 ストローク、バス法[7]を用いて磨くように指示された。

各試行において被験者はまず標準条件として対照条件（フィルタなし，0 dB 条件）下で歯を磨いた。次に比較条件下で歯を磨き，比較条件時の主観的な印象を評価した。この時の評価軸は快・不快感および達成感の 2 つであり，被験者はテンキーを用いてそれぞれをモニタ上に表示されたビジュアルアナログスケールで回答した。スケールは 100 段階であり，それぞれの左端（0）には「不快／磨けていない」，右端（100）には「快／磨けた」と表示されていた。被験者は標準条件時のそれぞれの印象を 50 とした時の比較条件の印象を評価した。回答時には制限時間を設けなかった。

被験者は一人あたりこの評価タスクを 54 試行（（ピーク周波数 5 条件+フィルタなし条件）×音量レベル 3 条件×繰り返し 3 試行）行った。比較条件はランダムに提示され，被験者に各比較条件のパラメータは伝えられなかった。

本試行の前に，被験者はヘッドホンを装着せずに数試行練習を行った。また本試行開始前と 9 試行おきに，歯を汚すためにポテトチップスを 1 枚左側の歯で噛み，食べるように指示された。被験者は実験中自由に口をゆすぐことを許可されていた。

本実験には 7 名（男性 4 名，女性 3 名；22 から 25 歳；全員右利き）が参加した。

#### 4.2.4.3 実験結果

音量レベル 3 条件に対する快・不快感の評価値の平均値を図 4-27 に示す。グラフの x 軸はバンドパスフィルタのピーク周波数、y 軸は評価値、エラーバーは標準偏差を示す。実験結果に対して 2 要因（周波数 6 条件×音量レベル 2 条件）の被験者内分散分析を行った。その結果、音量レベル要因において主効果が有意であった ( $F(2, 12)=4.51$ ,  $p<0.05$ )。音量レベル 0 dB の条件で快・不快感の評価値（平均 (M) =52.4; 標準偏差 (SD) =2.6）は -20 dB (M=44.6; SD=1.5) および 20 dB (M=40.0; SD=9.1) の条件よりも高かった。また、周波数要因と音量レベル要因間の相互効果が有意であった ( $F(10, 60)=3.10$ ,  $p<0.01$ )。周波数 4000Hz およびフィルタなし条件下での音量レベル要因、音量レベル 20 dB 条件下での周波数要因において単純主効果が認められた（それぞれ順に  $F(2, 12)=4.69$ ,  $p<0.05$ ;  $F(2, 12)=7.68$ ,  $p<0.01$ ;  $F(5, 30)=4.69$ ,  $p<0.01$ )。本結果より音量レベルが 20 dB の時、周波数変調が快・不快感に大きな影響を与えることが明らかとなった。

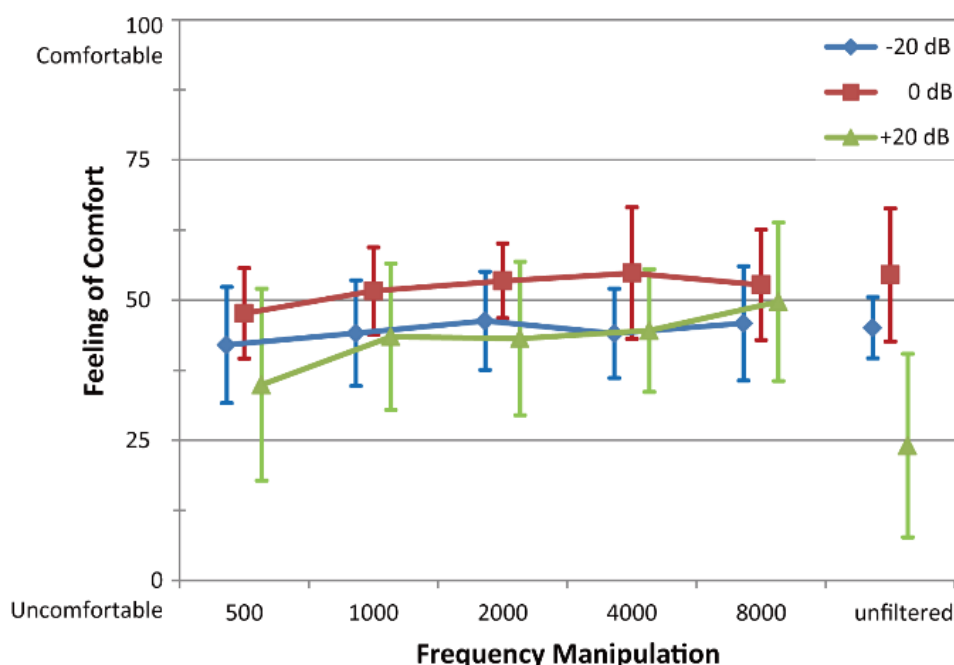


図 4-27 実験 1 の結果（快・不快感の評価）：

x 軸はバンドパスフィルタのピーク周波数、y 軸は評価値を示す。

音量レベル 3 条件に対する達成感の評価値の平均値を図 4-28 に示す。グラフの x 軸はバンドパスフィルタのピーク周波数、y 軸は評価値、エラーバーは標準偏差を示す。本実験結果に対して 2 要因（周波数 6 条件×音量レベル 2 条件）の被験者内分散分析を行った。その結果、周波数要因と音量レベル要因において主効果が有意であった（それぞれ順に  $F(5, 30)=13.12$ ,  $p<0.01$ ;  $F(2, 12)=21.33$ ,  $p<0.01$ )。また、周波数要因と音量レベル要因間の相互効果が有意であった ( $F(10, 60)=6.22$ ,  $p<0.01$ )。周波数 2000Hz, 4000Hz, 8000Hz およびフィルタなし条件下での音量レベル要因、音量レベル 20 dB 条件下での周波数要因において単純主効果が認められた（それぞれ順に  $F(2, 12)=5.12$ ,  $p<0.05$ ;  $F(2, 12)=9.11$ ,  $p<0.01$ ;  $F(2, 12)=18.33$ ,  $p<0.01$ ;  $F(2, 12)=29.07$ ,  $p<0.01$ ;  $F(5, 30)=25.12$ ,  $p<0.01$ )。本結果より音量レベルが 20 dB 条件の時、周波数変調が快・不快感と同様に達成感に大きな影響を与えることが明らかとなった。



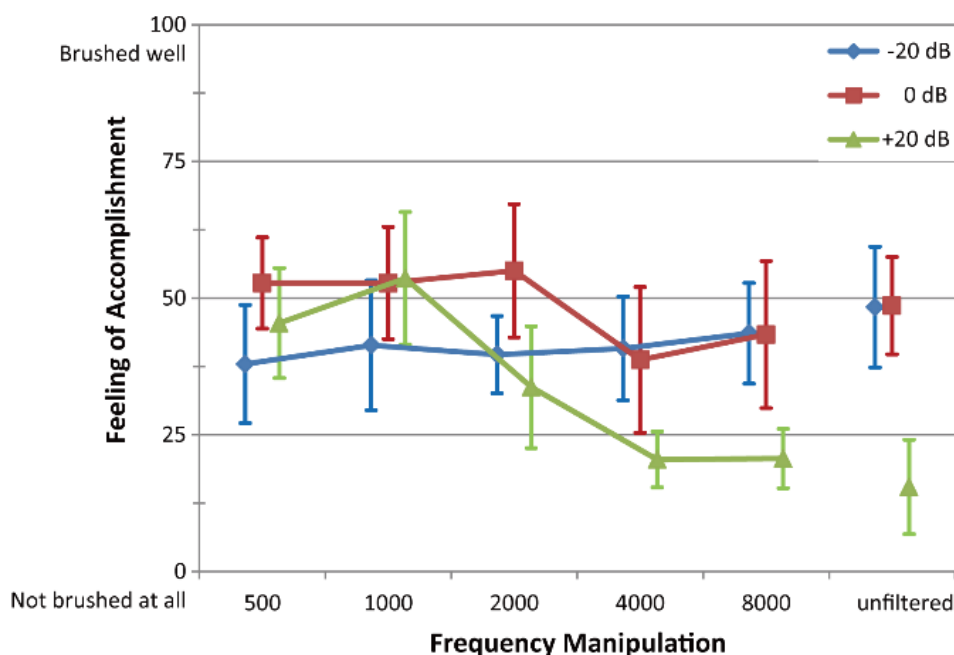


図 4-28 実験 1 の結果 (達成感の評価) :

x 軸はバンドパスフィルタのピーク周波数, y 軸は評価値を示す.

2 つの評価軸の相関を検証するために, 平均評価値を二次元座標 (x 軸: 快・不快感, y 軸: 達成感) にプロットした (図 4-29). Spearman の順位相関検定を行った結果, 2 つの評価軸に弱い正の相関が見られた ( $R=0.358$ ) が, 有意水準には達しなかった ( $t(16)=1.54, p=0.14$ ). また同様の分析を音量レベル 20dB 条件のみのデータで行ったところ, 有意水準には達しなかった ( $t(3)=1.30, p=0.28$ ) が, 強い負の相関が見られた ( $R=-0.600$ ).

#### 4.2.4.4 考察

本実験結果より音量レベルを上げ, バンドパスフィルタによって周波数変調することで, 歯磨き時の快・不快感および達成感を変えることが可能であることが明らかになった. したがって快・不快感提示による直感的なフィードバックの実現および達成感の制御によるモチベーション向上手法の可能性が示唆された. また実験終了後, 全被験者から「自身の歯磨き音を聞くという体験自体が非常に興味深い体験であった」, 「歯磨き音に変調されることで歯磨きの印象が変わった」との報告があった.

4名の被験者から歯磨き音が大きくなるほど, 達成感が増したとの内観報告があった. 一方で他の 1名の被験者から磨き音が大きすぎて自分で磨いている感じがしないとの報告もあった. この報告は, 先の 4名の報告がある一方で, 音量レベル 20 dB 条件下で達成感の評価が低かったことに起因していると考えられる. また 2名の被験者が, 磨き音が大きすぎて不快であったと報告している. こちらも音量レベル 20 dB 条件下で快・不快感の評価が低かったことに起因していると考えられる. これらの報告から, 音量レベル 20 dB 条件は数人の被験者にとっては音が大きすぎたと考察できる. したがって,

今後は 0 から 20 dB 間での同様の実験を行い、最適な音量レベルについて検討する必要がある。

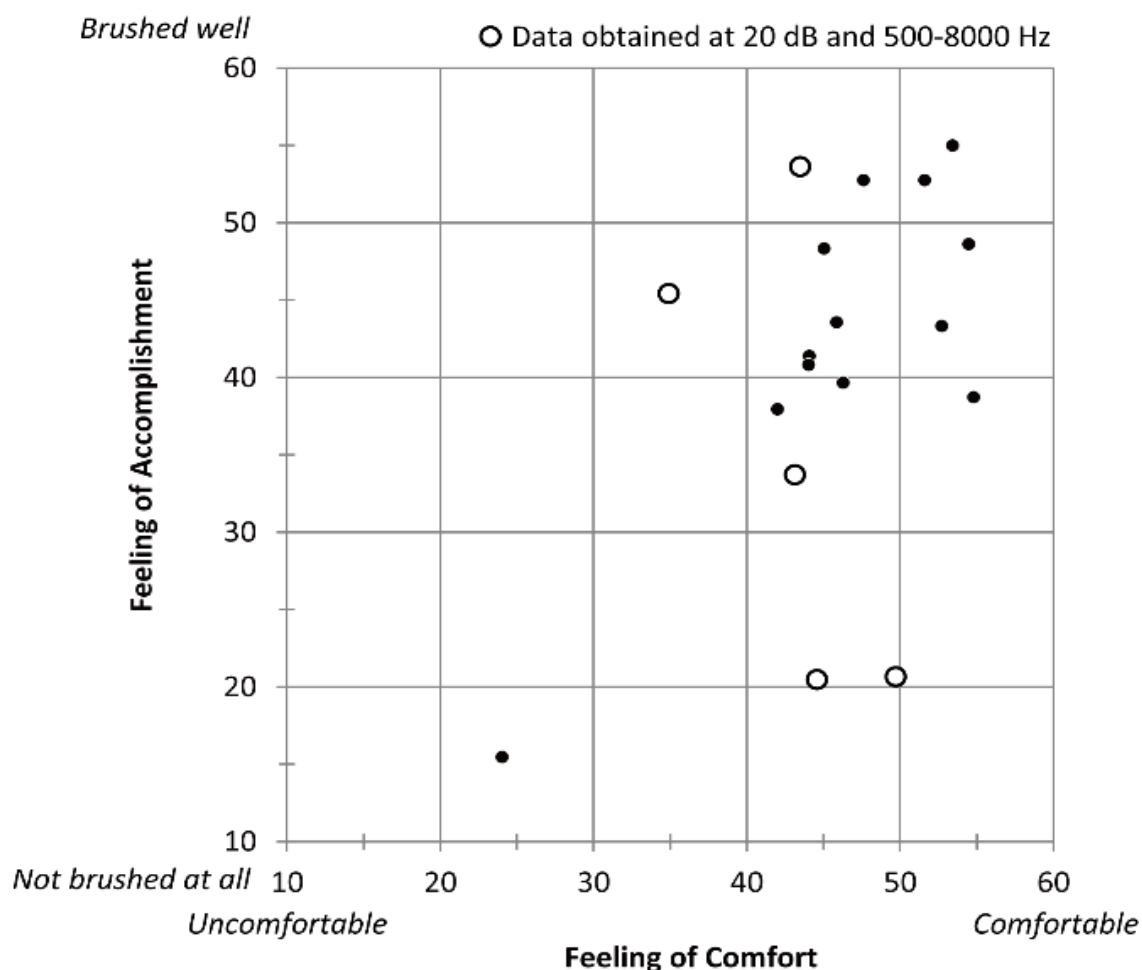


図 4-29 実験 1 の結果 (快・不快感と達成感の評価の相関) :  
x 軸は快・不快感, y 軸は達成感を示す。

一方で、音量レベル-20 および 0 dB 条件では周波数要因の影響が小さかった。その理由として、音量レベル-20 dB 条件では音量レベルが小さすぎて被験者が周波数の違いを知覚できなかった可能性が考えられる。また音量レベル 0 dB 条件においても、バンドパスフィルタを適用すると結果として音量レベルが下がるので、同様に被験者は周波数の違いを知覚できなかったと考えられる。

全体としては快・不快感と達成感の評価軸には弱い正の相関が見られた一方で、音量レベル 20 dB 条件下では強い負の相関が見られた。被験者からの内観報告を考慮すると、快の印象は高周波成分より生起し、達成感には低周波成分より生起していると考えられる。先行研究より、前者（高周波成分提示時）は歯の表面が滑らかかつ乾いた印象が生起し被験者は快感を覚えたと考えられる。逆に後者（低周波成分提示時）において、被験者は歯の表面に粘性のある食べ物のかすのようなものを感じていたと考えられる。このため被験者はこれらを取り除いている印象を受け達成感を高く評価したと考えられる。

しかし周波数 500 Hz 条件において、達成感の評価は低くなる傾向にあった。これは被験者が自身の歯もしくはブラシが特定できない柔らかいもののように感じられたため、もはや歯を磨いているように感じられなかったためと考えられる。さらに、フィルタなし条件においては快・不快感、達成感ともに評価が著しく低下した。これは先に考察したとおり、音量レベルが大きすぎたため、不快感が生じ、かつ達成感が感じられなかったためと考察できる。2名の被験者が、評価に影響したかは不明であるが実験中マイクロホンが歯磨きと関係のない音、例えば環境音や信号線と機の接触音等を拾っていたと報告した。これは本実験では無指向性のマイクロホンを採用したためである。今後は圧電素子を利用したピックアップ型マイクロホンによって、空気振動を介さない歯ブラシからの直接の歯磨き音の検出を試みる。

本実験から明らかとなったことは以下の2点である。

1. 低周波成分を強調した場合、不快感および達成感が生起する。
2. 高周波成分を強調した場合、快感および未達成感が生起する。

これらは歯磨きの印象を歯磨き中に制御、変化させるといった設計を可能にする。例えば、歯磨きの時間に応じて徐々に強調する周波数を徐々に上げていくことで、歯が美化されていく過程が鮮明になり、ユーザは通常の歯磨きよりも快感および達成感を覚えると予想できる。次項の実験2でこの時間的な歯磨き音の周波数変動効果について検証する。

## 4.2.5 実験2：歯磨き音の時間的変動の効果検証

本実験では歯磨き音の時間的な変動が歯磨きの快・不快感および達成感に与える効果について検証する。

### 4.2.5.1 セットアップ

本実験では歯磨き音録音用のマイクロホンに圧電素子を利用したピックアップ型マイクロホン（Kikutani Music, EGT-101）およびピックアップマイクロホン用プリアンプ（Moridaira, Morris Preamp 20）を使用した。これは歯磨きと関係のない音、例えば環境音や信号線と機の接触音等を遮断するためである。他の構成は実験1で使用した歯ブラシと同様であった。

本実験では音声処理に Max を用いた。また、実験1と同様にバンドパスフィルタ（ $Q=1.0$ ）を採用した。実験1の結果を考慮して以下の条件を設定した。時間的な変動としてピーク周波数が 1000Hz から 8000Hz に上昇する条件と、逆に下降する条件を設定した。それぞれの条件では歯を磨いている間、10秒かけて対数軸上で線形にピーク周波数が上昇、下降した。さらに対照条件としてフィルタなし条件を加え計3条件を設定した。音量レベルとして3条件（0, +10dB, +20 dB）を設定した。また対照条件（フィルタなし, 0 dB 条件）の音圧レベルを騒音計によっておよそ 75 dB(A)になるように調整した。その他の条件では Max が示す音量レベルより調整した。

実験 1 と同様に被験者の把持力が 20 N を超えた場合、ビーブ音が提示されるようにした。また、歯を磨き始めてから 10 秒後に周波数の異なるビーブ音 (2000Hz の正弦波) を提示し、1 試行の終了を被験者に教示した。

実験 1 と同様に被験者は机の前、シンクの隣のいすに腰を掛け、ヘッドホンを装着した。机の上には歯ブラシ、LCD、テンキー、水の入った紙コップおよびポテトチップスが置かれていた。

#### 4.2.5.2 実験手続き

被験者は本実験での歯の磨き方について実験 1 と同様の指示を受けた。本実験では 5 ストロークの代わりに、ビーブ音が鳴るまでの 10 秒間歯を磨くように指示した。評価方法は実験 1 と同様 (対照条件はフィルタなし, 0dB 条件) であった。被験者は一人あたりこの評価タスクを 27 試行 ((時間的変動 2 条件+フィルタなし条件) ×音量レベル 3 条件×繰り返し 3 試行) 行った。比較条件はランダムに提示され、被験者に各比較条件のパラメータは伝えられなかった。

本試行の前に、被験者はヘッドホンを装着せずに数試行練習を行った。また本試行開始前と 3 試行おきに、歯を汚すためにポテトチップスを 1 枚左側の歯で噛み、食べるように指示された。被験者は実験中自由に口をゆすぐことを許可されていた。本実験には 7 名 (男性 4 名, 女性 3 名; 21 から 26 歳; 全員右利き) が参加した。7 名のうち 3 名が実験 1 にも参加していた。

#### 4.2.5.3 実験結果

9 条件の快・不快感の評価値の平均値を図 4-31 に示す。エラーバーは標準偏差を示す。本実験結果に対して 2 要因 (時間的変動 3 条件×音量レベル 3 条件) の被験者内分散分析を行った。その結果、時間的変動要因 ( $F(2, 12)=8.08, p<0.01$ ) および音量レベル要因 ( $F(2, 12)=8.70, p<0.01$ ) において主効果が有意であった。また時間的変動要因と音量レベル要因間の相互効果が有意であった ( $F(4, 24)=4.00, p<0.05$ )。ピーク周波数が下降する条件および上昇する条件下での音量レベル要因 (下降:  $F(2, 12)=7.97, p<0.01$ : 20dB>10dB および 0dB (有意水準 5%での Bonferroni 検定); 上昇:  $F(2, 12)=16.29; p<0.01$ : 20dB および 10dB>0dB), 音量レベル 0dB, 10dB および 20dB 条件下での時間的変動要因 (0 dB:  $F(2, 12)=4.54, p<0.05$ : 上昇>下降; 10dB:  $F(2, 12)=9.47, p<0.05$ : フィルタなしおよび上昇>下降; 20dB:  $F(2, 12)=6.02, p<0.05$ : 上昇>下降およびフィルタなし) において単純主効果が認められた。

9 条件の達成感の評価値の平均値を図 4-30 に示す。エラーバーは標準偏差を示す。本実験結果に対して 2 要因 (時間的変動 3 条件×音量レベル 3 条件) の被験者内分散分析を行った。その結果、時間的変動要因 ( $F(2, 12)=5.64, p<0.05$ ) および音量レベル要因 ( $F(2, 12)=10.50, p<0.01$ ) において主効果が有意であった。また時間的変動要因と音量レベル要因間の相互効果が有意であった ( $F(4, 24)=3.09, p<0.05$ )。

また、ピーク周波数が下降する条件、上昇する条件およびフィルタなし条件下での音量レベル要因 (下降:  $F(2, 12)=5.79, p<0.01$ : 20dB>0dB; 上昇:  $F(2, 12)=28.01, p<0.01$ : 20dB および 10dB>0dB; フィルタなし:  $F(2, 12)=4.44, p<0.01$ : 20dB>0dB), 音量レベル 10dB および 20dB 条件下での時間的変動要因 (0 dB:  $F(2, 12)=4.54, p<0.05$ : 上昇>

下降; 10dB :  $F(2,12)=9.47, p < 0.05$  : フィルタなしおよび上昇>下降; 20dB :  $F(2, 12)=6.02, p < 0.05$  : 上昇>下降およびフィルタなし) において単純主効果が認められた。

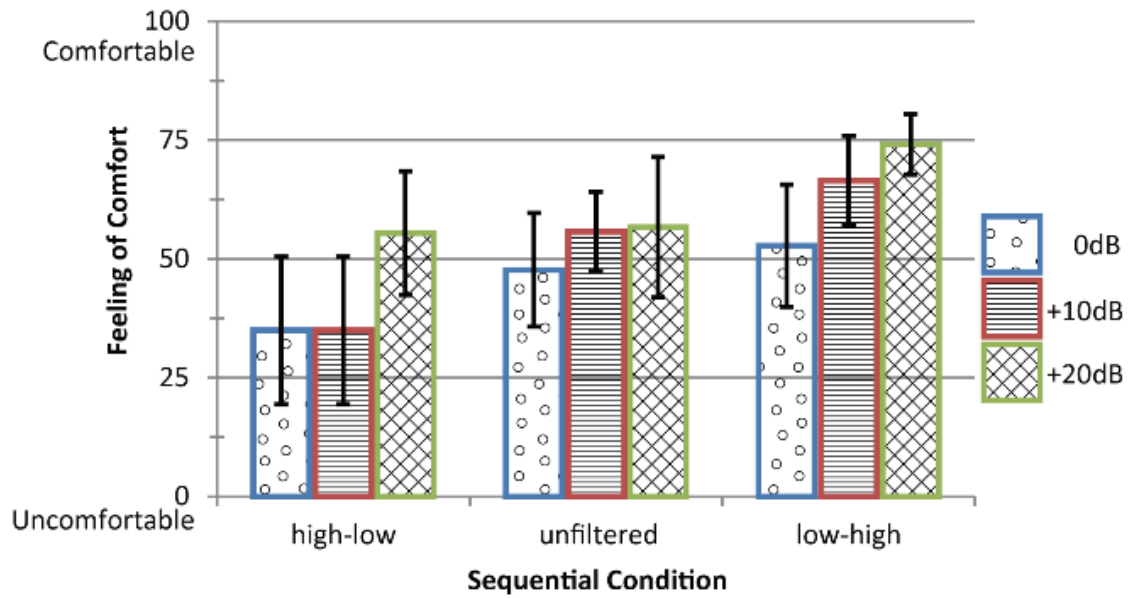


図 4-31 実験 2 の結果 (快・不快感の評価)

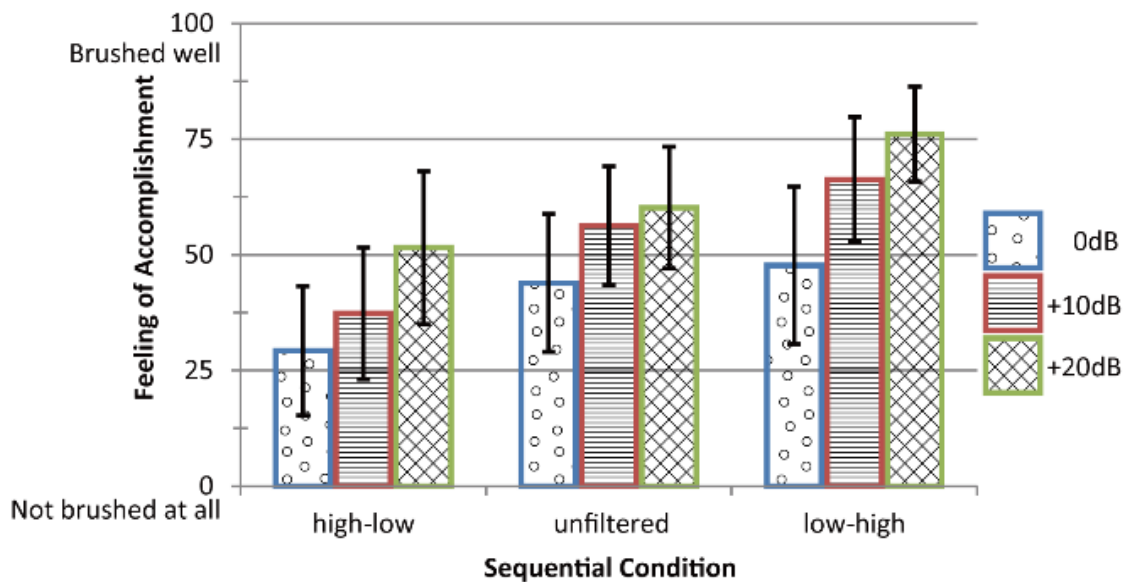


図 4-30 実験 2 の結果 (達成感の評価)

#### 4.2.5.4 考察

本実験結果より以下に示す 2 点が明らかとなった。

1. 音量レベルが大きいほど、より快感および達成感が生起する。
2. 時間的にピーク周波数を上昇させると、より快感および達成感が生起する。

前者に関して、音量レベルが大きすぎると不快感や未達成感を生起するという実験 1 とは異なる結果となった。これは圧電素子ピックアップ型マイクロホンが歯磨きと関係のない音を遮断したためと考えられる。

後者に関しては、実験 1 の結果より、まず低周波時には被験者は歯が汚れているように感じるので不快感を覚えたと考えられる。そしてピーク周波数が増えるにつれ被験者は歯が美化されているように感じ快感を覚えたと考えられる。この結果歯を美化するというプロセスが鮮明となり、より快感および達成感を覚えたと考えられる。

さらに音量レベルと時間的変動の相互作用効果により 20dB でピーク周波数が増える条件下で最も高い評価値が観測された。本評価値は対照条件（フィルタなし、0dB）の約 1.5 倍の評価値を示した。また 0dB でピーク周波数が減少する条件下で対照条件の約 0.5 から 0.75 倍といった最も低い評価値が観測された。このような大きな効果は実験 1 より観測されなかったことから、セットアップが異なるので厳密な比較はできないが、時間的変動の歯磨きの印象に与える効果は音量レベルより大きいと考えられる。

また、現在のセットアップの制限として、次の 2 点が挙げられる。一点目は、歯を磨く動作から変調音が提示されるまでの遅延である。この遅延は主に音声処理で用いたソフトウェアが原因である。実験終了後の内観報告において、遅延によって歯磨きのリズムが狂ったことが評価に影響したことが指摘されている。二点目は、実験中に生じる痛みである。本実験では、望まない要因が実験結果に影響してしまうことを避けるため、被験者に同じ歯を磨くように指示した。そのため、内観報告より数名の被験者が実験中に痛みを覚えた報告しており、いずれも痛みが評価に影響を及ぼした可能性がある。試行数を減らすことで痛みを和らげることが可能であると考えられるが、分析できる要因が減ってしまうという実験上の不具合が生じる。

#### 4.2.6 まとめ

本研究では、歯磨き音を変調するシステムを実装し、これを用い聴覚刺激による疑似触覚提示によって歯の質感が変わったかのような体験を提供することで歯磨きの印象修飾を行った。本システムの効果を検証するために 2 つの被験者実験を行った。その結果、次の 4 点が明らかとなった。1) 低周波成分を強調した場合、不快感および達成感が生起する。2) 高周波成分を強調した場合、快感および未達成感が生起する。3) 音量レベルが大きいほど、より快感および達成感が生起する。4) 時間的にピーク周波数を増えさせると、より快感および達成感が生起する。以上より、本手法によって歯磨きの印象を制御する直感的なフィードバックが実現できることを示した。

本研究は、歯磨きに対するモチベーションを向上させることを背景に、直感的なフィードバックを実現することを目的に行われた。これに対し、歯磨き音を録音、変調して

提示することで歯の質感が変わったかのような体験を提供するシステム、拡張歯ブラシを実装した。本手法は聴覚刺激によって生起する疑似触覚提示を利用したものである。これは実際に生じる音に操作を加え変調したといえる。

本研究初期段階において、歯に大きな食べかす等が付着していないかぎり、歯磨きによって生じる音もしくは振動は歯の状態（汚れている、美化されている）に依存しないことを予備的に確認した。したがって、ユーザは通常歯磨き音を手がかりに歯の状態を把握しているとは考えにくい。しかし、聴覚刺激によって生起する疑似触覚提示を利用した本手法において、2つの実験で示したとおり、ユーザは歯の状態を想起することができた。さらに歯を磨いた感覚（達成感）に関しても一定の尺度で評価することができた。

以上より、本研究は誇張表現のうち変調モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発であったといえる。また、歯磨き音を変調することで実感性のともなった歯磨きの印象修飾が実現できたと結論づけられる。

## 4.3 トクトク感再現: 傾ける動作に応じた振動提示によるトクトク感再現

本節では徳利を傾けた際に内容液の流出によるトクトクという振動（トクトク感）提示の設計・開発について述べる。実際に徳利から液体が流出する際に生じる振動を計測、モデリングし、実際に液体を注ぐことなくトクトク感を再現する。実験的に構築した振動モデルをもとに、粘性感および残量感提示を実現する。

### 4.3.1 研究背景

飲食体験は味や香り、食感といった飲食物を口腔内に含んだ時の直接的な刺激に加え、飲食物を盛り付ける容器や周りの環境等の間接的な刺激にも影響を受けることが知られている。一般的に料理の盛りつけや見た目、食事中的会話やバックグラウンドミュージックが飲食体験を豊かにすることが知られている。こうした間接的な刺激によって飲食体験を演出することが可能である。

飲食物を食べる際の演出は先に述べたような視覚や聴覚的な演出だけでなく、触覚的な演出も考えられる。なぜなら、飲食物を口腔内に運ぶ際、飲食物や食器が手に触れることが多いためである。Brown は被験者実験より、ラップに包まれたパンはワックスペーパーに包まれた同じ鮮度のパンよりも新鮮に感じられることを示し、包材の触感が鮮度知覚に影響を及ぼすことを報告した[17]。

本節では飲食体験における触覚的演出として徳利で液体を注ぐ際に生じる振動に着目する。徳利は液体を注ぐ際に生じる独特の「トクトク」という音と振動で知られている。心地よい音と振動を生み出す徳利[59]も製品として販売されていることから、徳利から液体を注ぐ際の振動は飲食体験の重要な触覚的演出であると考えられる。

本研究の最終的な目標は、トクトク感をペットボトル等の液体を注ぐ際に生じる振動が比較的小さい容器に重畳することで飲料に対する触覚的演出を実現することである（5.1 節参照）。本節ではこれを実現するための振動モデルを構築する。そのために、まず実際に徳利を傾けて水が流出する際の振動を計測・記録し、その振動のモデリングを行い、構築された振動モデルを用いたトクトク感の再現を行う。そして演出の幅を広げるために、液体の粘性感および容器に液体がどれほど残っているかという残量感を再現する振動モデルを構築する。

### 4.3.2 先行研究

我々は日常生活において水をはじめ様々な流体に道具を介して、もしくは直接身体で触れる。VR 研究において流体との多感覚インタラクションの再現は VR の質を向上させる上で重要である。Cirio らは SPH (Smoothed-Particle Hydrodynamics) モデルを用いて様々な粘度の流体とのリアルタイムでの触覚インタラクションを実現した[24][25]。五十嵐らは実際の水から生じる反力に力提示装置で力を重畳することで、水流や粘性感を提示するといった液体の物性を力提示装置で変調するという触覚 AR を実現した[68]。

飲食体験に関連した流体の触感再現が行われている。Hashimoto らはユーザのストロークの吸引動作に応じて振動を提示することで固体を含む様々な物体を流体として吸引



する感覚を再現した[53]. 國安らは液体を注いだ際の体験を再現する触覚提示装置を開発した[87]. この触覚提示装置は本研究と同様に液体を注ぐ際に心地よさに着目したものであるが、彼らの目的は心地よい触覚提示の再現とそれによる触覚のみ（もしくは聴覚との組み合わせ）によるエンタテインメントの実現であった. これに対し、本研究の最終的な目的はトクトク感重畳による飲食体験の演出である.

### 4.3.3 トクトク感再現

本項ではトクトク感再現のための振動モデルの構築およびその評価について述べる. まず、徳利を傾けた際に水が流出することで生じる振動の加速度を計測する. その加速度を元に振動モデルを構築する. そして傾き計測および振動提示が可能な徳利型装置を設計・開発し、構築した振動モデルを用いてトクトク感の再現を行う. 最後に設計・開発した装置を用いて振動モデルの妥当性を検証する被験者実験について述べる.

#### 4.3.3.1 振動計測

徳利を傾けた際に生じる振動を計測するために図 4-32 左に示す計測システムを構築した. 本システムは加速度センサ (Kionix, KXM52-1050), A/D コンバータ (Interface, PCI-3523A), PC, 固定台, 徳利から構成された. 使用した徳利を図 4-32 右に示す. 徳利の容量は約 300ml であった. 本徳利の他にも数種類の徳利を用いることを検討したが、本徳利は特に触覚的に感じられる振動が発せられていたことから本計測に用いた. 加速度センサを加速度センサの x 軸と徳利の注ぎ口が平行になるように固定した. 加速度センサの出力電圧を 25ksps のサンプリングレートで A/D コンバータを介して計測し PC に記録した.

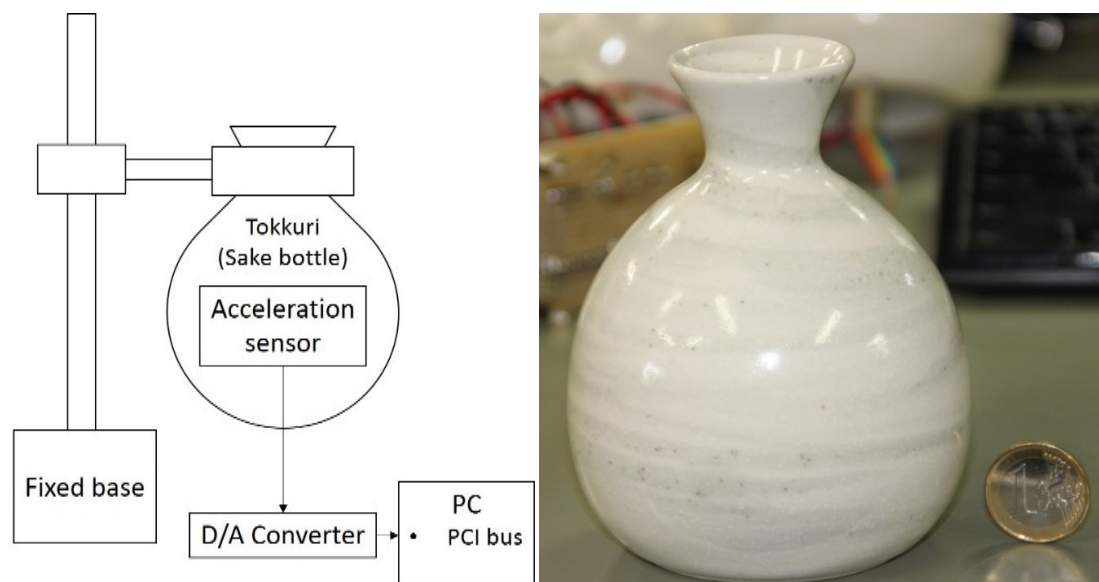


図 4-32 左) 計測システム, 右) 計測に使用した徳利

まず徳利の口を真上に向けた状態で固定台に固定し、満水まで水を注いだ. 次に、徳利の口に蓋をして徳利を傾けた. 徳利を傾ける角度に関して、徳利の口を真上にした状態を 0 度とし、90 度, 115 度, 135 度, 155 度, 180 度の 5 条件を設定した. そして、蓋を外すと同時に計測を開始した. 計測は角度 1 条件に対して 5 回ずつ、計 25 回行った.

計測結果の一例として 180 度条件での計測結果を図 4-33 に示す。5 回のいずれの計測でも同様の波形が周期的に観測された。また他の角度条件においても角度に応じて振幅等に差異はあるものの同様の傾向の波形が観測された。

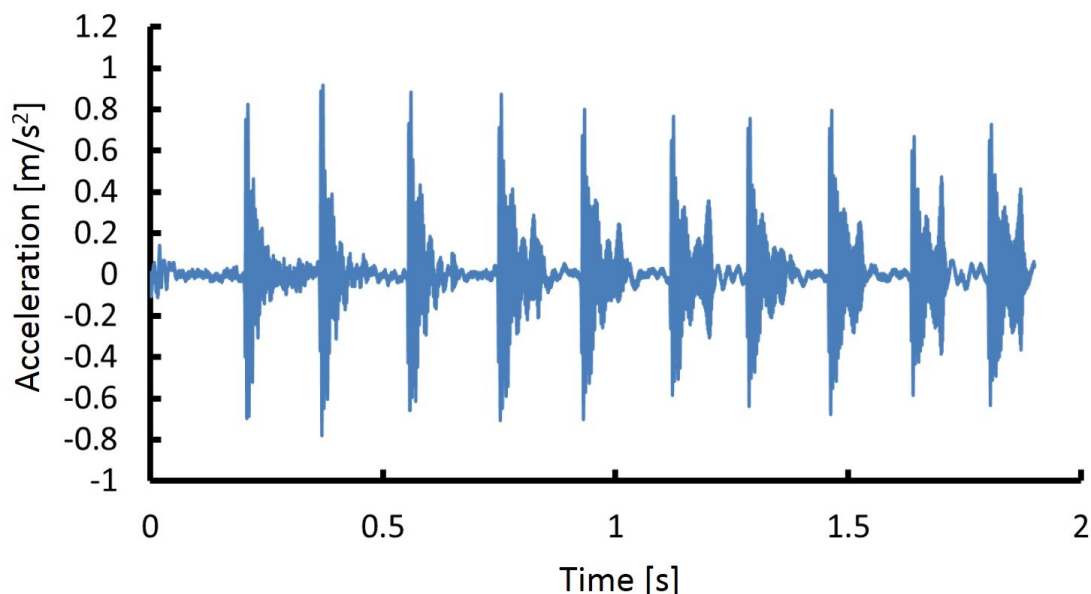


図 4-33 計測結果の一例：傾き角度 180 度で計測。

#### 4.3.3.2 モデリング

図 4-33 より、同様の波形が周期的に観測されたため、ここではそのうちの 1 つの波形を抽出して分析、モデリングを行った。抽出した波形を図 4-34 上に示す。本波形は徐々に減衰しているため、本波形は減衰正弦波を用いてモデリングが可能であると考えられる。抽出した波形に対してフーリエ変換を行った結果、2 つのピークが観測された(図 4-34 下)。以上より、抽出した波形は 2 つの異なる周波数の減衰正弦波の合成でモデリングできると考えられる。徳利を角度  $\theta$  傾けた際の時刻  $t$  における振動加速度  $Q$  を次式に示す。

$$Q(\theta, t) = \sum_{n=1}^2 A_n(\theta) \exp(-B_n(\theta)t) \sin(2\pi f_n(\theta)t) \quad (7)$$

ここで、 $A_n$  は初期振幅係数、 $B_n$  は減衰係数、 $f_n$  は振動周波数を表し、角度  $\theta$  に依存する。ただし、 $n=1$  を低周波減衰正弦波、 $n=2$  を高周波減衰正弦波とする。これらをパラメータとして、最小二乗法を用いてモデル式の計測結果へのフィッティングを行った。他の角度条件における計測結果に対しても同様の分析、モデリングを適用した。

各角度条件におけるパラメータを表 4-5 に示す。ここで、 $T$  は抽出した波形の周期であり、計測者が目測で決定した。本モデリングでは、これらのパラメータに対し計測角度によって線形補完を行った。図 4-36 に示すように、180 度条件の計測結果と構築した振動モデルは同様の波形となった。

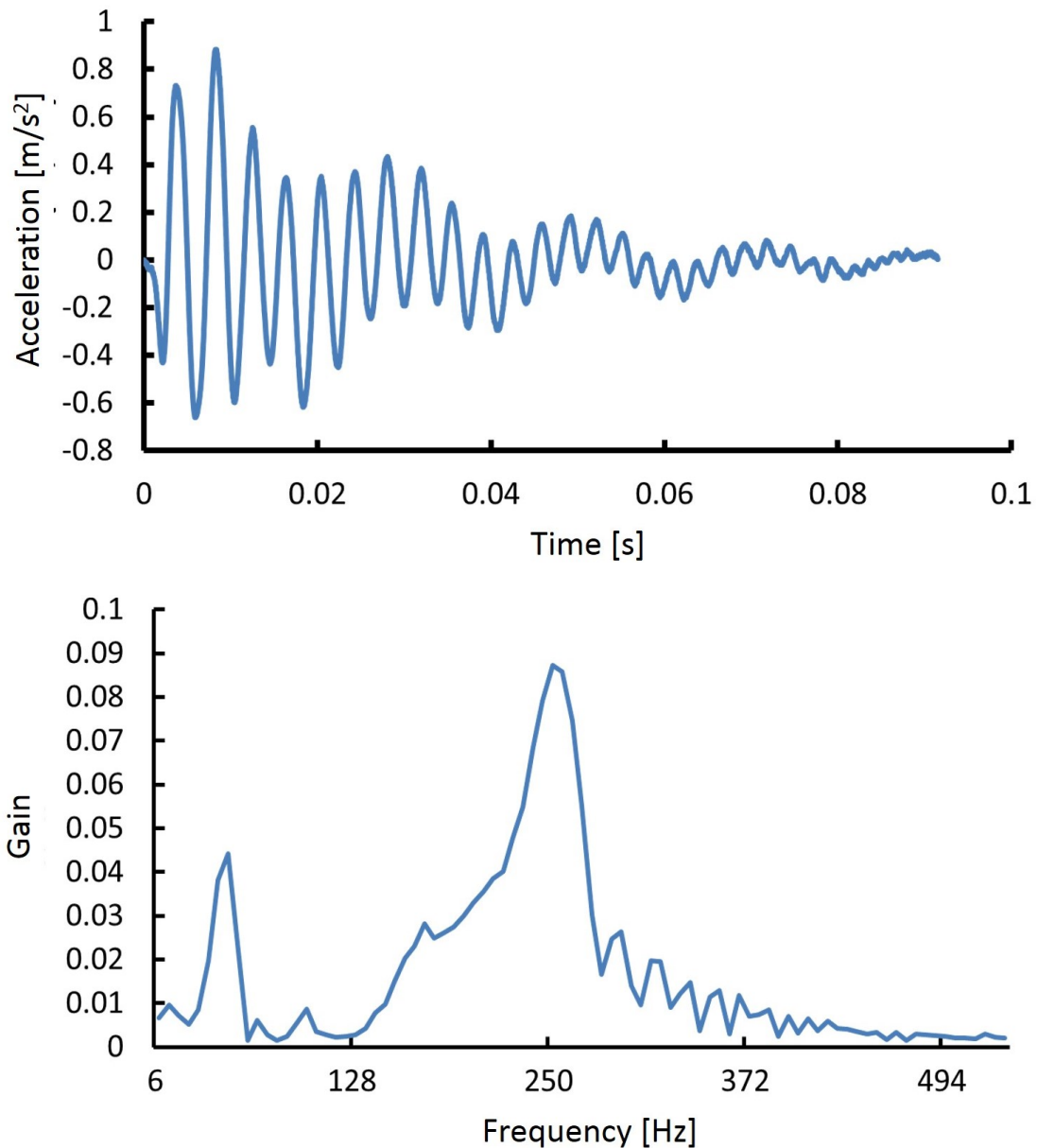


図 4-34 上) 抽出した波形：傾き角度 180 度で計測，下) フーリエ変換の結果

本計測結果より，いずれの角度条件においても低周波振動周波数  $f_1$  (48~73Hz) と高周波振動周波数  $f_2$  (250~354Hz) が観測された．低周波成分に関しては，明確に結論づけられないが，液面のゆらぎによるものと考えられる．高周波成分に関しては，次に述べるヘルムホルツ共振が関与していると考えられる．

徳利のような狭い開口部をもった容器 (図 4-35) は内部の空気がばねとしての役割を果たし，共振することで振動が発生する．このような振動発生装置をヘルムホルツ共振器といい，共振周波数  $f_H$  は空気中の音速  $v$ ，容器の内容量  $V_0$ ，開口部の長さ  $l$ ，開口部の半径  $r$ ，開口部の断面積  $S$  によって決まり，次式で求められる．

$$f_H = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V_0(l+r)}} \quad (8)$$

本計測で使用した徳利の容積  $V_0$  は 300ml, 開口部の長さ  $l$  は 2cm, 開口部の半径  $r$  は 1cm であり, 空気中の音速  $v$  を 340m/s とすると共振周波数  $f_H$  は約 320Hz となり, 本計測で観測された高周波振周波数  $f_2$  とほぼ一致する.

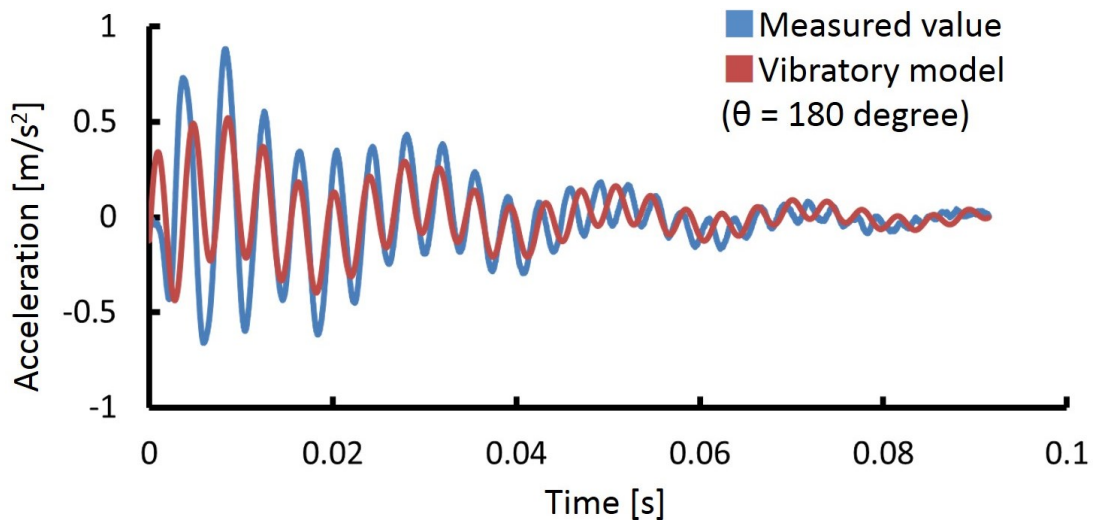


図 4-36 180 度条件での計測結果および振動モデル

表 4-5 最小二乗法によって得られた各角度条件における振動モデルのパラメータ

$\theta$ [degree]	$A_1$ [m/s <sup>2</sup> ]	$A_2$ [m/s <sup>2</sup> ]	$B_1$ [s <sup>-1</sup> ]	$B_2$ [s <sup>-1</sup> ]	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$T$ [s]
90	0.135	0.034	17	3.5	73	354	0.124
115	0.339	0.132	15	5.2	61	305	0.092
135	0.442	0.095	20	1.8	61	269	0.116
155	0.339	0.232	10	16	48	256	0.116
180	0.466	0.197	31	22	48	250	0.192

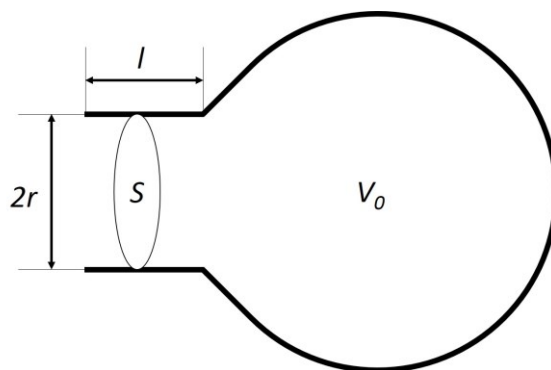


図 4-35 ヘルムホルツ共振

また、 $f_1$ および $f_2$ はいずれもヒトの皮膚感覚で受容できる周波数帯域内であり、おもにFA-IおよびFA-IIによって受容される(2.2項参照)。したがって、計測で用いた徳利は比較的触覚を生起しやすい設計であったといえる。以上から本徳利は本研究の目的を果たす上で最適な徳利の一つであったといえる。

#### 4.3.3.3 再現

構築した振動モデルを用いてトクトク感が再現できるかを確認するため、徳利型装置を開発した。本装置のシステム構成を図4-37左に示す。本システムはボイスコイル型リニアアクチュエータ(TactileLabs, Haptuator MarkII)、加速度センサ(Kionix, KXM52-1050)、オーディオアンプ(RASTEME SYSTEMS, RSDA202)、マイクロコントローラ(Arduino, Duemilanove)、PCから構成される。加速度センサおよびアクチュエータは計測に用いた徳利と同様の徳利の内部に固定した(図4-37右)。本装置の傾き $\theta$ を加速度センサで計測し、マイクロコントローラを介してPCに送信する。PCではその値と構築した振動モデルを元に音声処理ソフトウェアPure Dataによって振動信号を生成し、オーディオ出力する。信号はオーディオアンプで増幅され、アクチュエータを駆動する。

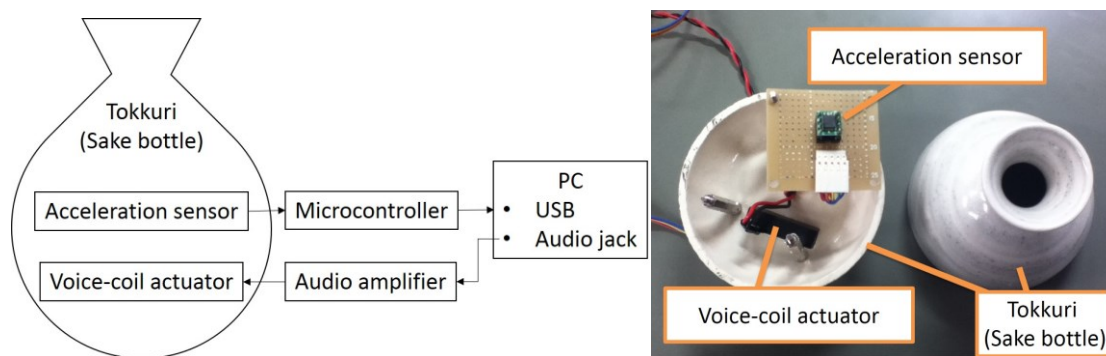


図 4-37 左) システム構成, 右) 徳利型装置の内部構造

図4-38に徳利型装置の周波数応答性能を示す。x軸は周波数、y軸は振動加速度の振幅を表す。本データは正弦波(振幅1Vrms; 10-500Hzまでを10Hz間隔)をアクチュエータに印可した際の装置の把持部に固定した加速度センサ(Kionix, KXM52-1050)の値である。本装置はアクチュエータの制約上30Hzより低い周波数を印加することは困難である。しかし、振動受容器(FA-IおよびFA-II)を刺激すること、また構築した振動モデルを適用することにおいて十分な周波数帯域を有している。

#### 4.3.3.4 トクトク感振動モデルの妥当性検証実験

設計・開発した徳利型装置を用いて構築した振動モデルの妥当性を検証する実験を行った。

##### セットアップ

本実験では開発した徳利型装置および計測で使用した徳利を用いた。振動モデルには、1) 低周波減衰正弦波と高周波減衰正弦波の重ね合わせ(式(7))(重ね合わせ条件)、2) 高周波減衰正弦波のみ(高周波条件)、3) 低周波減衰正弦波のみ(低周波条件)、の3条件を設定した。

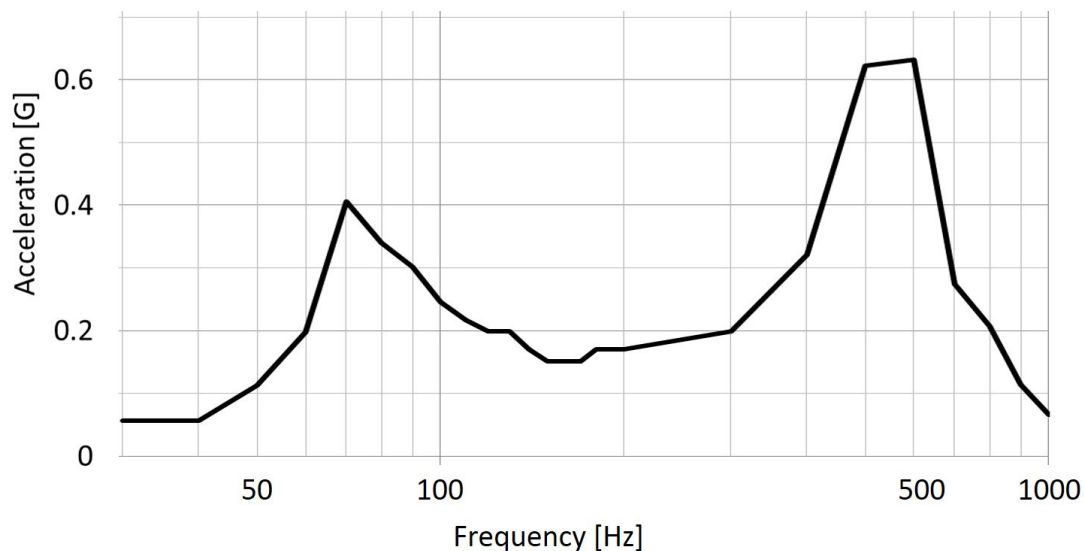


図 4-38 徳利型装置の周波数特性

#### 実験手続き

被験者はまず 300ml の水が入った徳利を片手で把持し、素早く 135 度に傾け、この時に生じる徳利の振動を覚えるように指示された。5 秒後に徳利型装置を 0 度の位置に戻した。この操作を 5 回繰り返した。

次に、徳利型装置を同様に把持し、素早く 135 度に傾け、この時に提示される振動を覚えるように指示された。5 秒後に徳利型装置を 0 度の位置に戻した。この操作を 2 回繰り返した。この時に適用される振動モデルには振動モデル 3 条件から 2 条件がランダムに選択された。そして被験者は徳利型装置で提示された 2 条件の振動モデルのうちどちらが徳利から水を注いだ際に感じた振動に似ていたかを強制二択で回答した。この 2 条件の比較を 6 試行 (3 条件から 2 条件を選んで得られる順列数;  ${}_3P_2=6$ ) 繰り返した。

以上の試行を被験者一人あたり 3 回繰り返した。本実験には 6 名 (男性 5 名, 女性 1 名; 22 から 23 歳) が参加した。実験中、被験者にヘッドホンよりホワイトノイズを提示し聴覚的な手がかりを遮断した。ただし、徳利を 135 度に傾ける際および 0 度に戻す際にはビープ音より合図を出した。また、被験者には実験終了まで振動モデルのパラメータは伝えられなかった。

#### 実験結果

より徳利から水を注いで感じた振動に似ていると回答された確率を表 4-6 および、Thurston の一対比較の結果を図 4-39 に示す (グラフの x 軸は回答度の大きさを示し、大きいほど徳利から水を注いで感じた振動に似ていると回答される確率が高い)。本結果に対して一要因 (振動モデル {重ね合わせ, 高周波, 低周波}) 被験者内分散分析を行った結果、振動モデル要因において有意差が認められた ( $F(2)=26.6, p<0.001$ )。さらに、Holm 法 (有意水準 5%) をを用いた多重分析の結果、重ね合わせ条件>高周波条件、重ね合わせ条件>低周波条件、そして高周波条件>低周波条件であることが明らかとなった。

表 4-6 実験結果：より徳利から水を注いだ振動に似ていると回答された確率.

Comparison vibratory model			
	Superposition	High-frequency	Low-frequency
Superposition	-	80.1%	94.4%
High-frequency	19.4%	-	86.1%
Low-frequency	5.1%	13.9%	-

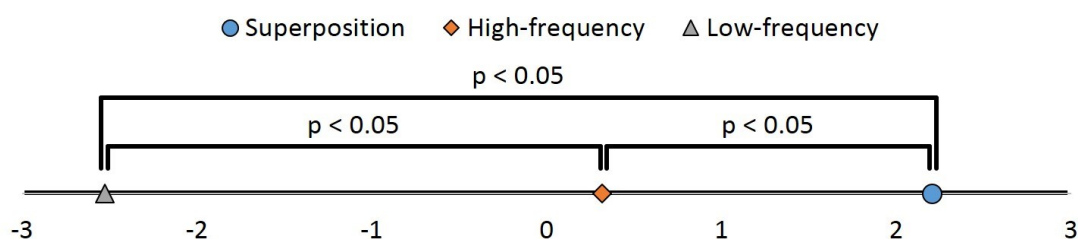


図 4-39 Thurston の一対比較の結果

以上の分析結果より、構築した振動モデル（重ね合わせ条件）が最も実際に水を注いだ感覚に似ていることが示唆された。したがって本振動モデルはトクトク感の再現性において妥当であるといえる。

#### 4.3.4 粘性感の再現

本項では演出の幅を広げるために、液体の粘性感を再現する振動モデルを構築する。まず粘性の異なる液体を徳利から注いだ際の振動を計測する。次にその計測結果をもとに振動モデルを構築する。そして、構築した振動モデルを用いた際、パラメータをどれほど変化させれば粘性が変わったと気がつくかという粘性感弁別実験を行う。

##### 4.3.4.1 振動計測

本計測では前項と同様の計測を行った。ただし、とろみ食材改良材（ニュートリー、ソフティア S）を水に溶かすことで粘度の異なる 3 種類の液体（1000mPa・s, 2000mPa・s, 4000mPa・s）を用いた。計測は 75 試行（粘性 3 条件×角度 5 条件×繰り返し 5 試行）を行った。

##### 4.3.4.2 モデリング

計測の結果、前項の水での計測結果と同様で、同様の波形が周期的に現れたので、1 つの波形を抽出して分析、モデリングを行った。抽出した波形を図 4-40 上に示す。計測結果から粘性が高くなるほど最大振幅が小さくなる傾向が観測された。フーリエ変換を行ったところ、前項と同様に 2 つのピークが観測された一方で、液体の粘性が高くなるほど低周波と高周波の振幅が小さくなっていくことが観測された(図 4-40 下)。また、粘性の差異によって波形が現れる周期  $T$  に大きな変化は見られなかった。以上の分析結

果より，粘性感を再現するための振動モデルとして最大振幅モデルと振幅比モデルの2つのモデルを構築した。

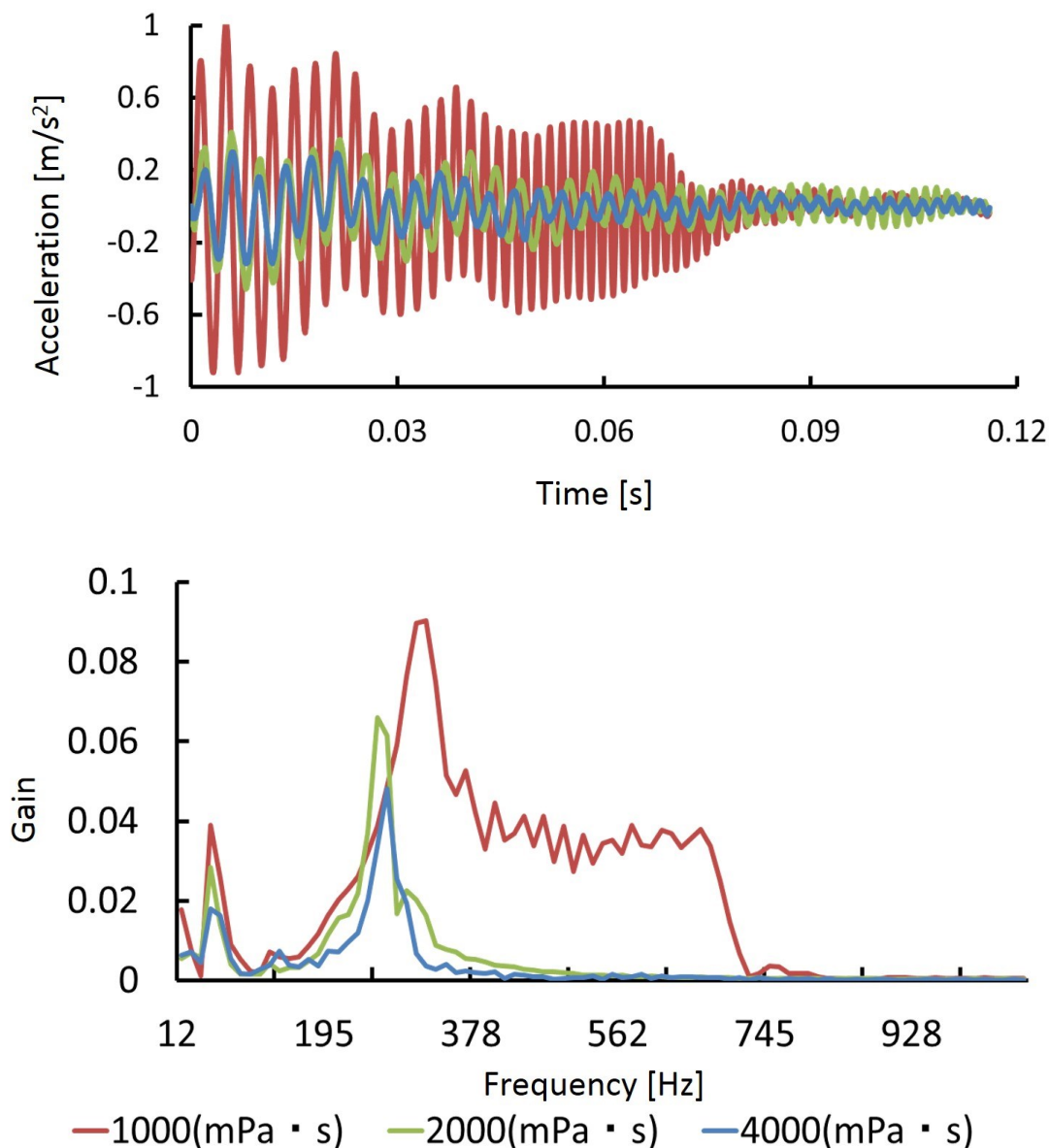


図 4-40 異なる粘度の液体での振動計測：

上) 抽出した波形：傾き角度 135 度で計測，下) フーリエ変換の結果。

最大振幅モデルは，粘度が高くなると最大振幅が小さくなるという分析結果から，粘度に応じて式(7)の初期振幅  $A_n$  の値を調整するというモデルである．最大振幅モデルを用いて粘性感が生じるかを予備的に検証した．本検証では徳利型装置を用いた．被験者に高い粘度を再現した最大振幅モデルと前節で構築した水の振動モデルを提示し，比較させ自由回答を求めた．その結果，被験者は最大振幅モデルに対して「軽い」，「振動が小さい」，「なめらか」と感じ，同種類の液体の流れ方が変化したように感じられたと回



答した。つまり、最大振幅モデルでは粘性感という異なる物性の液体を注いだ感じは再現できていなかったと考えられる。

前節での水および本節での粘性をもった液体に対するフーリエ変換の結果、2つのピークが観測された。表 4-7 に示すように、周波数の振幅の比率（低周波減衰正弦波の振幅／高周波減衰正弦波の振幅）は粘度が大きくなるに連れて増大している。したがって、低周波振動を強く感じられると粘性感が生起すると考えられる。

表 4-7 フーリエ変換で観測された2つのピークの振幅比（135度条件）

	Water	Low-viscosity	Middle-viscosity	High-viscosity
<b>Amp (low-freq.)</b>	<b>0.029</b>	<b>0.030</b>	<b>0.033</b>	<b>0.038</b>
<b>Amp (high-freq.)</b>	<b>0.061</b>	<b>0.057</b>	<b>0.059</b>	<b>0.052</b>
<b>Ratio</b>	<b>0.48</b>	<b>0.53</b>	<b>0.56</b>	<b>0.73</b>

この仮説に基づき、粘度に応じて式(7)の振幅の比率を調整する振幅比モデルを構築した。本モデルによる振幅変調を次式に示す。

$$A_1(\theta) = cA_{sum}, A_2(\theta) = (1 - c)A_{sum} \quad (9)$$

where  $0 < c < 1$

ただし、最大振幅モデルの予備的な検証を考慮し、振幅比モデルでは全体の最大振幅を一定とした ( $A_1 + A_2 = A_{sum} = const.$ )。また、 $c$  は最大振幅を1としたときの振幅比であり、水の粘性を提示する際は0.33とした。振幅比モデルを用いて粘性感が生じるかを予備的に検証した。最大振幅モデルと同様の手続きで検証を行った。その結果、被験者は振幅比モデルに対して「ボコボコしている」、「泡の粒が大きい」と感じ、液体の種類が変化したように感じられたと回答した。さらに「粘性が高くてゆっくり出ている気がする」という回答があったことから、振幅比モデルでは粘性感が表現できていたと考えられる。一方で、本モデルは計測結果を忠実に再現したモデルではなく、粘性感が生起しやすいように計測結果をもとに構築した非現実的なモデルである。

#### 4.3.4.3 粘性感弁別実験

構築した振幅比モデルにおいて、振幅比をどれほど変化させるとヒトが液体の粘性が変化したと気がつくかという粘性感弁別閾を計測した。

##### セットアップ

本実験では徳利型装置と振幅比モデルを用いて、恒常法に基づき粘性感弁別閾を計測した。

本実験では水の振幅比 ( $c=0.33$ ) を標準刺激とし、比較刺激を9条件 ( $c=\{0.18, 0.22, 0.26, 0.29, 0.33, 0.37, 0.41, 0.45, 0.49\}$ ) を設定した。また予備実験より徳利型装置を90度に傾けた際に振動の変化を感じやすかったため、本実験では被験者に常に徳利を90度に傾けるように指示した。

### 実験手続き

まず、被験者は利き手で徳利型装置装置を把持し 90 度に傾けて振動モデル A を体験し、5 秒後に元に戻した。次に、同様の操作で振動モデル B を体験した。そしてより粘性を感じた振動モデルを強制二択 (A もしくは B) で回答した。振動モデル A および B にはランダムに標準刺激と比較刺激が適応された。また比較刺激は 9 条件の中からランダムに選択された。

以上の試行を被験者一人あたり 90 試行 (比較刺激 9 条件×繰り返し 10 試行) 行った。本実験には 3 名 (男性 2 名, 女性 1 名; 21 から 22 歳) が参加した。実験中、被験者にヘッドホンよりホワイトノイズを提示し聴覚的な手がかりを遮断した。また、被験者には実験終了まで振動モデルのパラメータ等は伝えられなかった。

### 実験結果・考察

比較刺激が「より粘性がある」と回答された確率およびロジスティック曲線によるフィッティングの結果を図 4-41 に示す。本結果より、25% 弁別閾、75% 弁別閾はそれぞれ、 $c=0.29$ ,  $0.42$  であった。したがって、 $c=0.33$  のとき  $c$  を  $0.65$  ほど変化させることで異なる粘性感を提示することが可能であることが明らかとなった。

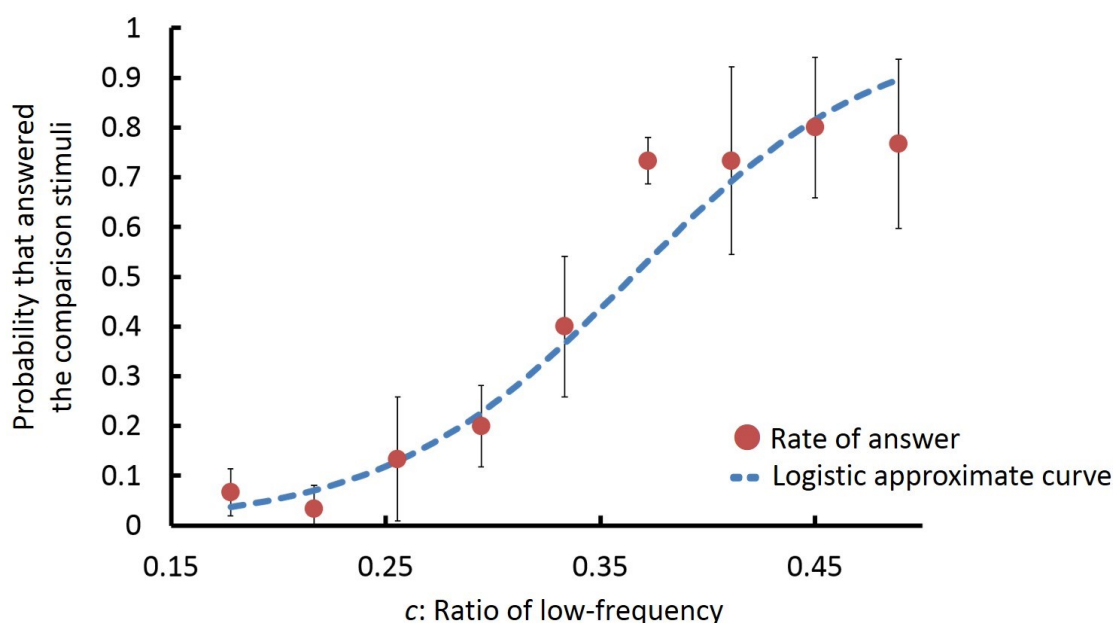


図 4-41 実験結果：振幅比率と粘性があると回答した確率。  
ロジスティック曲線によりフィッティング

### 4.3.5 残量感の再現

本項では演出の幅を広げるために、液体の残量感を再現する振動モデルを構築する。これまでの振動モデルは徳利内部の液体の残量を考慮しない無限に液体が流出し続けるものであった。これに対し、徳利から水を注いだ際の振動と徳利内部の水の残量を同時に計測し、その結果を利用して残量を考慮した振動モデルを構築する。

#### 4.3.5.1 振動計測

徳利を傾けた際に生じる振動および徳利内部の水の残量を計測するために図 4-42 に示す計測システムを構築した。計測システムおよび計測方法は 4.3.3 項と同様であるが、水の残量を電子天秤（エーアンドデイ，EK-6100i）によって 5sps のサンプリングレートで計測し，PC に記録した。

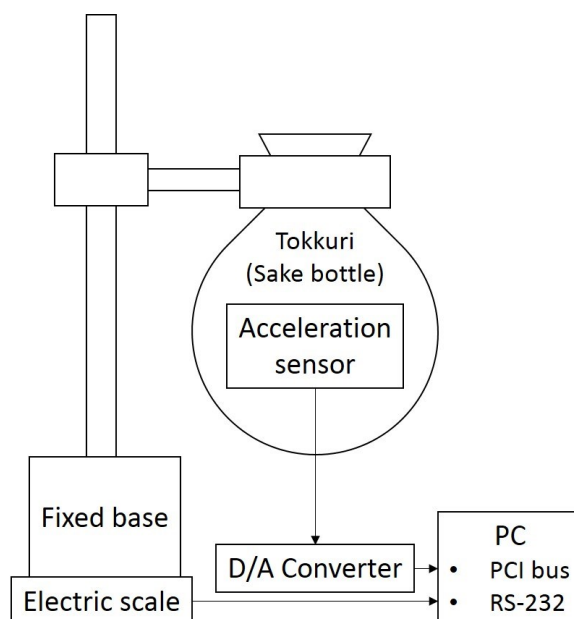


図 4-42 計測システム

計測結果の一例として 135 度の条件での計測結果を図 4-44 に示す。振動波形に関して、これまでと同様に、同様の減衰正弦波形が周期的に観測された。残量の減り方（流出速度）および最終的な残量は傾き角度に依存することが観測された。一方で、流出速度は時刻に依存せずほぼ一定であった。残量と周期的に現れる減衰正弦波の最大振幅の関係を図 4-43 に示すとおり、残量が減るにつれて最大振幅が減少する。さらに線形回帰分析を行った結果、残量と最大振幅の間に強い相関が見られた ( $R^2=0.6358$ )。他の減衰正弦波パラメータ ( $B_n, f_n$ ) は残量によって一定、もしくは不規則に変化したため、本稿では詳細な分析は省略し、以降は 4.3.3 節で得られた残量を考慮していない際のパラメータを用いる。これらの傾向は他の傾き角度でも同様であった。

#### 4.3.5.2 モデリング

計測結果から、流出速度は傾き角度に依存し、時刻に依存しないことが明らかとなった。したがって、残量  $V$  は流出速度  $v$  によって次式で表せる。

$$V(\theta, t) = V_0 - \int_0^t v(\theta)\tau d\tau \quad (10)$$

ここで  $\theta$  は徳利の傾き角度、 $t$  は時刻、 $V_0$  は初期残量である。

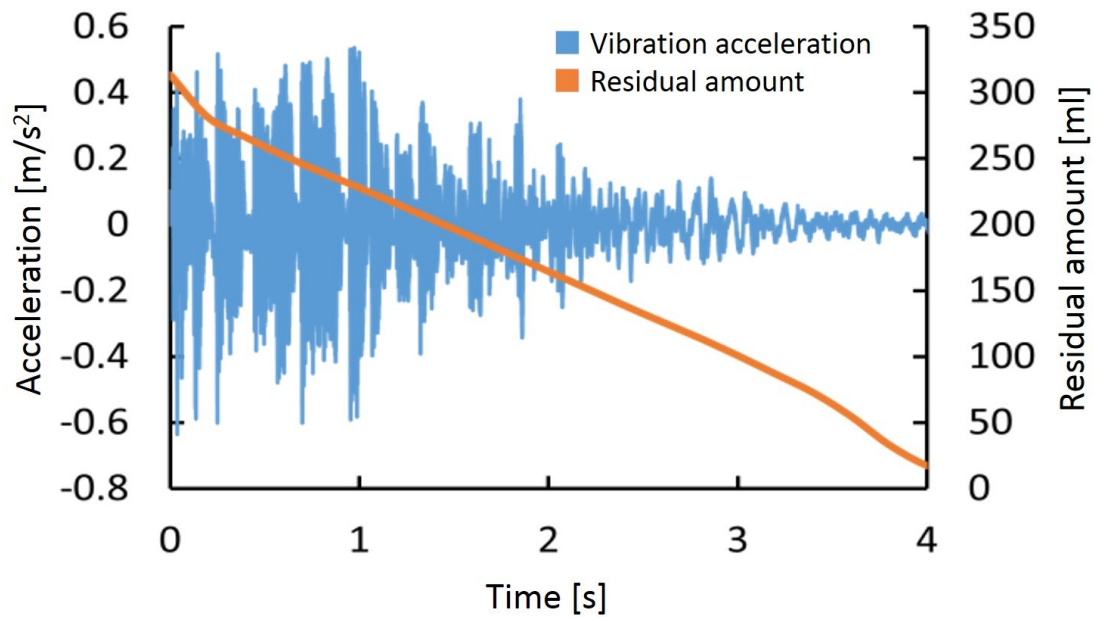


図 4-44 計測結果の一例：傾き角度 135 度で計測.

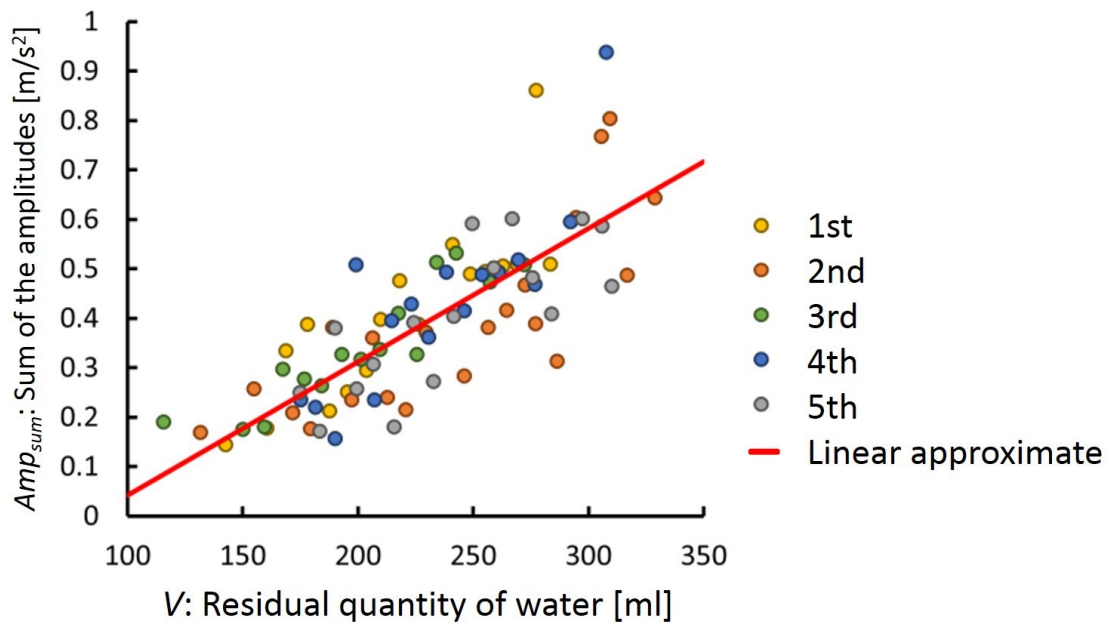


図 4-43 残量と最大振幅の関係：傾き角度 135 度で計測.

また残量が減るにつれて周期的に現れる減衰正弦波の最大振幅が直線的に減少していくことが明らかとなった（図 4-43）. この最大振幅は式(9)における初期振幅の合成  $A_{sum}$  と見なすことができ、次式で表せる.

$$A_{sum} = k(\theta)V \quad (11)$$

ここで  $k$  は傾き角度によって決まる変数である。以上、式(10)(11)(9)(7)より振動加速度  $Q$  が求められる。図 4-45 に  $\theta=135\text{degree}$ ,  $c=0.33$  での振動モデルからの振動加速度と計測結果を示す。

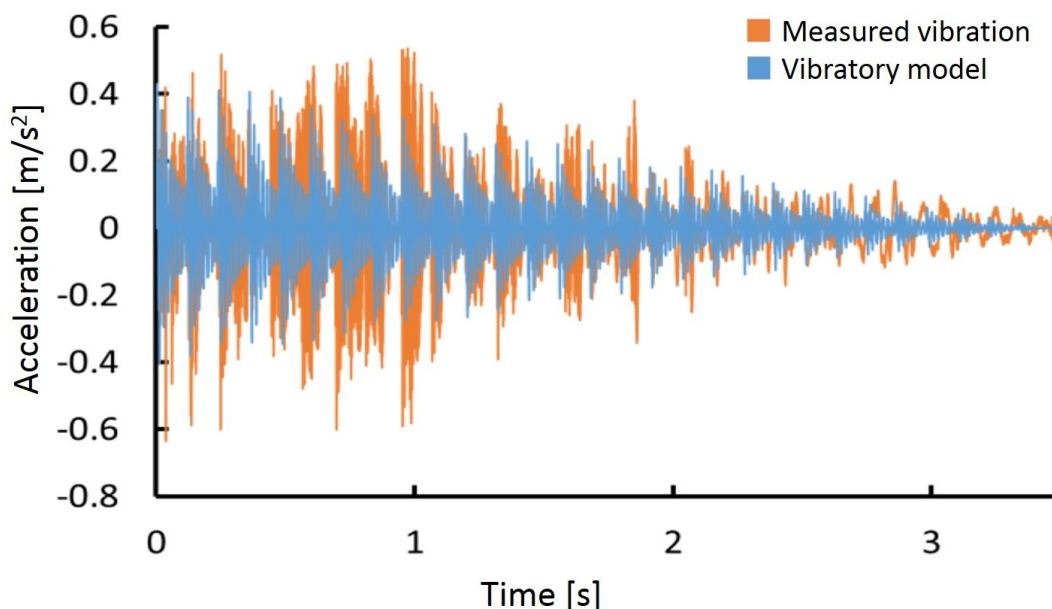


図 4-45 振動モデルと計測結果の比較：傾き角度 135 度で計測。

#### 4.3.5.3 再現

構築した振動モデルによって残量感を再現できるかを検証するために徳利型装置を用いて振動提示を行った。著者と同じ研究室のメンバー7名に体験してもらったところ、従来の振動モデル（残量を考慮していないモデル）と比較して、本振動モデルはより自然な感じがしたという報告が得られた。これは残量に応じて徐々に振動の最大振幅が減少していくという内容液の減少を再現ができていたためと考えられる。一方で、装置を傾けた瞬間に想起した残量よりも少なく感じたという報告もあった。これは本手法の制約でもあるが、液体の質量感を提示できないため、想起される残量がユーザ間でばらついてしまうためと考えられる。また、前節で述べた振幅比モデルより、振動が強調されていることも影響していると考えられる。我々が物体に触れた瞬間に生じる振動や温度変化から対象の性状を想像するように、被験者が傾けた瞬間に提示される強調された振動によって残量を多く予想したため、注ぎ終わりにおいて予想よりも残量を少なく感じたと考察できる。

#### 4.3.6 まとめ

本研究では、徳利で水を注いだ際に液体の流出によって生じるトクトクという振動、トクトク感を再現するための振動モデルの構築を行った。実際に徳利によって生じる振動を計測し、モデリングを行った。また、徳利型装置を設計・開発して構築した振動モデルを用いてトクトク感の再現を行った。さらにトクトク感の表現の幅を広げるため粘性感および残量感を再現する振動モデルも構築した。被験者実験の結果、本装置および

振動モデルによって単純な水の流出に加えて、内容液の粘性感および残量感を再現可能であることを示した。

本研究は、触覚インタラクションによる飲食体験の演出の実現を背景に、様々なトクトク感を再現することを目的に行われた。これに対し、まず水が流出する際に生じる振動を計測し、振動モデルを構築した。そして粘性感および残量感を提示するために振動モデルに操作を加えることで振動の振幅比および最大振幅を変調した。これは実際に水を注ぐ際に生じる振動と本質的に同様の振動に操作を加え変調したといえる。

粘性感提示において、実際に粘性のある液体を注いだ際に観測された振幅比変化を基に、その変化を強調するという振幅比モデルを構築した。したがって、本振動モデルは現実ではありえない振動を提示する。また残量感提示においては、装置の質量を変化させることなく、振動の最大振幅を徐々に減少させることで再現を試みた。被験者実験より、ユーザは粘性をもった液体の流出や内容液の減少を想起することができた。

以上より、本研究は誇張表現のうち変調モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発であったといえる。また、水を注ぐ際の振動を変調することで実感性のともなった粘性感および残量感の再現が実現できたと結論づけられる。

## 4.4 第4章まとめ

本章では、HaCHIStick & HACHISStack, 拡張歯ブラシおよびトクトク感再現の3つの研究を挙げて、感覚  $A$  を本質的に同様な感覚  $A$  に操作  $k$  を加えて変調する変調モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発について述べた。本論文では本モデルに対して、現象の差異が増幅されるのでその現象が分かりやすくなるという効果を期待した。HaCHIStick & HACHISStack に関する研究では、高い応答性をもった振動変調によりタッチスクリーンの材質が変わったような体験が実現できたという点で期待した効果が得られたと結論づけられる。拡張歯ブラシに関する研究では、歯磨き音を変調することでユーザは歯の状態（汚れている／美化されている）を提示し、さらに変調を適切に設計することで通常よりも歯を磨けたように感じるという達成感の増強を可能にした点で期待した効果が得られたと結論づけられる。そして、トクトク感再現に関する研究では、実際に水を注ぐ際に生じる振動と本質的に同様の振動に振幅比・最大振幅変調の操作を加えることで、粘性感や残量感を再現できた点で期待した効果が得られたと結論づけられる。

3つの研究を通じて感覚提示の時間設計性が今後の研究あるいは新たな変調モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発において重要であると考えられる。感覚提示の時間設計性とは、時間軸での感覚提示の設計が考慮されていることを示す尺度である。時間設計性には応答的なものと動的なものが考えられる。前者は主に感覚提示に対する遅延評価である。無論、遅延が少なく主観的には感じられないシステムが理想であり、遅延が大きすぎると触覚インタラクションの実感性は減退する。しかし、あえてわずかな遅延を加える表現がありうる。カラオケにおけるエコー効果はその一例であり、元の歌声に遅延を加えた歌声を重ねることで響きを強調する。後者は主に継続的な変化に対する評価である。例えば、現在のビデオ視聴システムは早送りやスロー再生によって映像の長・短期的な変化を観察することが可能であり、動的な時間設計性に優れたシステムであるといえる。

HaCHIStick & HACHISStack に関する研究では、被験者実験より許容される遅延を明らかにし、システムが十分な応答性をもつことを示した。さらに、遅延をわずかに加えることで跳ね返りやめり込みといった材質感提示の幅を拡張できることを示した。したがって、感覚提示の応答的な時間設計性が高かったといえる。拡張歯ブラシに関する研究では、被験者実験において歯磨き動作と歯磨き音提示の間に遅延を感じる報告する被験者がいた。本システムは主に歯磨き音を変調するソフトウェアにおいて遅延が生じていた。以上から、感覚提示の応答的な時間設計性は低いといえる。一方で、動的に変調周波数を変化することで通常よりも歯を磨けたように感じるという達成感の増強を可能にした点で動的な時間設計性は高いといえる。トクトク感再現に関する研究では、被験者実験において特にシステムの遅延について言及する被験者はいなかった。これは徳利内部の液量が明示的に示されなかったため、液体が流れ出す徳利角度が不明瞭であったためと考えられる。特に時間的に最大振幅が減少する残量感の再現に関して、より実感性のある触覚インタラクションを実現するために応答、動的な時間設計性に関する検討が必要である。

感覚提示の時間設計性は誇張表現全体においても、その体験を評価する尺度、また誇張の度合いを評価する尺度の一つとして用いることができると考えられる。一般に、

我々は恒常的なものよりも変化するものに注意が向けられる。そのため触覚インタラクションにおいて、ユーザの身体動作に対する応答の遅延は対象の性状を把握するために重要な要素である。許容できないほどの大きい遅延は実感性を減退させ、わずかな遅延は感覚提示の何らかのアクセントになりうる。また、ユーザが身体を動かしていない定常状態においても、触れているものの動的な変化は対象の性状を把握するために重要な要素である。変化の速度を遅くしたり、速くしたりする等で表現の幅を広げられる。以上より、感覚提示の時間設計性は実感性向上において重要であり、また誇張の度合いを示す尺度となりうる。



## 第5章

# 重畳モデルに基づいた触覚インタラクション

本章では著者がこれまでに設計・開発した触覚インタラクションのうち、感覚  $A$  に別の感覚  $B$  を重畳する重畳モデルに基づく 3 つの研究について述べる。重畳モデルでは現実には組み合わせられない感覚が組み合わせることで、比喩的に体験が分かりやすくなることが期待される。一つ目はトクトク感重畳による徳利で液体を注いだ際に生じる振動のペットボトルへの重畳に関する研究である (5.1 節)。本研究では、4.3 節で構築した振動モデルを、液体を注いだ際に生じる振動の小さいペットボトルに重畳することで飲食体験の演出の可能性を検討する。二つ目は Jointonation によるユーザの関節の材質感変調に関する研究である (5.2 節)。本研究では、ゴムや木、金属を叩いた際に生じる振動およびロボットアーム駆動時に生じる振動をユーザの屈伸運動に応じて提示することで関節の材質感変調を行う。三つ目は VacuumTouch によるタッチスクリーン上での操作に対する引力提示に関する研究である (5.3 節)。本研究では、真空圧を利用してユーザに装置の装着を必要とすることなく引力提示手法の開発および操作に及ぼす効果を検証する。

### 5.1 トクトク感重畳：液体を容器から注ぐ動作に応じた振動重畳

本節ではトクトク感を実際のペットボトルで液体を注ぐ動作に重畳するトクトク感重畳の設計・開発について述べる。トクトク感重畳によって注がれる液体の量の錯誤効果を示し、飲食体験の演出への応用について検討する。

#### 5.1.1 研究背景

4.3 節では徳利で水を注いだ際に液体の流出によって生じるトクトクという振動、トクトク感を再現するための振動モデルの構築を行った。実際に徳利によって生じる振動を計測し、モデリングを行った。また徳利型装置を開発して構築した振動モデルを用いてトクトク感の再現を行った。さらにトクトク感の表現の幅を広げるため粘性感および残量感を再現する振動モデルも構築した。

本節では本トクトク感に関する研究の最終的な目標であるトクトク感重畳による飲食体験の実現について検討する。具体的には、ペットボトル等の液体を注ぐ際に生じる振動が比較的小さい容器にトクトク感を重畳することで飲料に対する触覚的演出を行う。被験者実験より、トクトク感重畳の有無がユーザの注いだ液体の量におよぼす影響を調査する。

#### 5.1.2 先行研究

イギリスの料理人 Heston Blumenthal は「食事は全ての感覚を働かせる唯一の行動である。しかし、これらの感覚が実際に口から脳に至る情報処理過程において、どれだけ

の影響を及ぼしているかを我々ははっきりと理解できていないだろう」と述べている[157]. このように、飲食は味や香り、食感といった味覚、嗅覚、触覚以外にも目や耳といった視覚や聴覚でも体験されることが指摘されている一方で、全ての感覚がどのように飲食体験に寄与していきえるかははっきりと解明されていない. Spence の研究グループは特に食に伴う感覚が飲食体験に及ぼす影響について研究している. 例えば、ジュースの味から共感的に想起される形状や音象徴の調査結果を応用したユーザの想像に合ったパッケージやラベルの設計指針の構築[114]や、騒音やバックグラウンドミュージック、咀嚼音等が風味やヒトの消費行動に及ぼす影響の調査[156]、飲食物の色が飲食体験や消費行動に及ぼす影響[139]等、飲食物の購入から飲食物の摂取までに生起する感覚が飲食体験に及ぼす影響が広く研究されている.

容器や食器の見た目が飲食物の量知覚に影響を及ぼすことが知られている. Wansink らは皿やスプーンが大きいほど皿に取り分けた食べ物の量が多く感じられることを示した[177]. また、飲料に関して、被験者実験より背の低いコップは高いコップより多くの飲料が注がれることも報告している[176]. 容器や食器は飲食物を摂取する際に手や口唇が接触することから触覚を生起させる. 包材の触感が鮮度知覚に影響を及ぼすことが報告されている[17]. このように容器や食器は飲食体験に影響を及ぼす.

飲食体験を VR/AR 技術を用いて拡張する手法が開発されている. Narumi の研究グループは HMD を用いて食べ物や皿の見かけ上の大きさを変えることで満腹感を制御する手法[151][109]、視覚と嗅覚のクロスモーダル効果を応用した疑似嗅覚提示装置によって調味料等を加えることなく食物の風味を変える手法[110][111]等を開発している. Koizumi らは食物の咀嚼音を変調することで食物の食感を変調したり、動物の鳴き声を提示することで食物がまるで生きていくかのように感じさせたりするシステム Chewing Jockey を開発した[83]. これに対し、本研究では液体を注ぐ際に比較的振動を生じない容器に対してトクトク感を重畳することで触覚的な飲食体験の演出を試みる.

### 5.1.3 アタッチメント型トクトク感重畳装置

開発したアタッチメント型トクトク感重畳装置を図 5-1 に示す. 本装置のシステム構成は徳利型装置 (4.3.3 項参照) と同様であるが、筐体は ABS 樹脂製で、標準的なペットボトルの開口部 (キャップ部分) に固定できる. 本装置はペットボトルに装着後、加速度センサによりペットボトルの傾きを計測し、その角度に応じて式(7)に基づいて振動を提示しトクトク感を重畳する.

### 5.1.4 トクトク感重畳が水を注ぐ量に及ぼす影響検証実験

本実験では、アタッチメント型トクトク感重畳装置を用いて、ペットボトルからコップに水を注ぐ際、トクトク感重畳が水を注ぐ量にどのような影響を及ぼすかを調査する.

#### 5.1.4.1 セットアップ

本実験ではアタッチメント型トクトク感重畳装置を装着した 500ml ペットボトル、容量 500ml のコップを用いた. また水を注ぐ目標量として 4 条件 (100ml, 200ml, 300ml, 400ml) および振動提示を 2 条件 (提示あり, 提示なし) 設定した. コップの内側には目標量 4 条件の水位を示す印を付けた. コップを電子天秤の上に固定し、被験者が実験



図 5-1 アタッチメント型トクトク感重畳装置：  
左) 装置外観，右) ペットボトルに装着した際の様子

中に注いだ水量を計測した。また，本実験では残量を考慮しない振動モデル（最大振幅が一定）を用いた。

#### 5.1.4.2 実験手続き

被験者は，コップが固定された電子天秤の前に着席した。まず，被験者は実験者より目標値を指示され，コップ内部の該当する印の位置を目視で確認した。次に，被験者はアイマスクおよびホワイトノイズが提示されたヘッドホンを装着し，視覚および聴覚を遮断した。そして，被験者はペットボトルより目標値に達したと感じるまでコップに水を注ぎ，その後実験者が電子天秤の値を記録した。目標値および振動提示条件はランダムに選択，提示された。

以上の試行を被験者一人あたり 40 試行（目標値 4 条件×振動提示 2 条件×繰り返し 5 試行）行った。本実験には 4 名（男性 2 名，女性 2 名；22 から 24 歳）が参加した。

#### 5.1.4.3 実験結果・考察

注いだ水量を分析するために，被験者ごとに全 8 条件それぞれの繰り返し 5 試行分の平均値を求め，その値を被験者間で平均した。図 5-2 の x 軸は注いだ水量の平均値，y 軸は目標値，エラーバーは標準偏差を示す。本実験結果に対し被験者内 2 要因分散分析（目標値要因 4 水準 {100ml, 200ml, 300ml, 400ml} × 振動提示要因 2 水準 {振動あり，振動なし}）を行った。その結果，目標値要因 ( $F(3,9)=103.5$ ,  $p<0.001$ ) および振動要因 ( $F(1,3)=14.7$ ,  $p<0.05$ ) において主効果が認められた。一方で，2 要因間の相互効果に有意差は認められなかった ( $F(3,9)=0.631$ ,  $p=0.613$ )。

本分析結果より，トクトク感が重畳されると注いだ水量が少なくなる傾向が観測された。この原因として，トクトク感重畳によってペットボトルからの水の流出が強調されたことが考えられる。通常，ペットボトルから水を注ぐ際，徳利と比較して微少な振動が生じる。この振動とペットボトルの質量の変化を手がかりに水をどれだけ注いだかが把握できる（振動なし条件）。一方で，本実験ではトクトク感重畳により通常よりも大きな振動が生じていたため，被験者は通常よりも大量の水が流出していると感じたと考

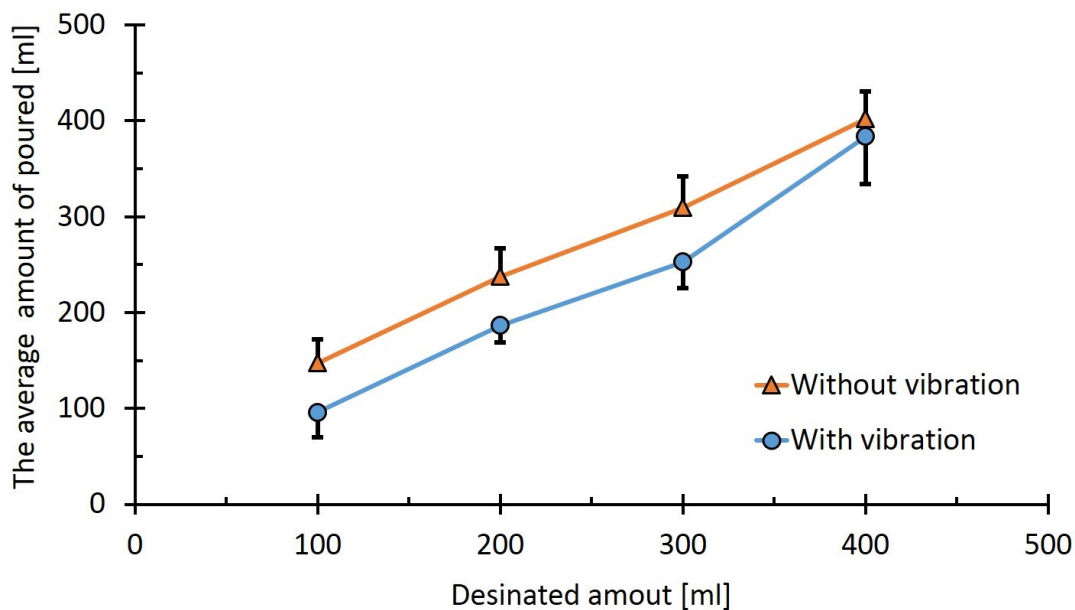


図 5-2 実験結果：注いだ水量と実験条件の関係：

x 軸は注いだ水量の平均値，y 軸は目標値，エラーバーは標準偏差を示す。

えられる。その結果，振動あり条件では振動なし条件よりも多くの水を注いだように感じ，注いだ水量が減少したと考えられる。

一方で，本実験では残量を考慮しない振動モデルを採用した。したがって，注いだ水量に関わらず一定の振幅が提示されていた。4.3.5 項でも示したとおり，残量の減少に伴って振幅は減衰する。そのため，振動の減衰が注いだ水量の手がかりになりうる。したがって残量を考慮した振動モデルを適用した場合，残量を考慮した振動モデルよりも注がれる水量が減少すると考えられるが，更なる調査が必要である。

液体を注ぐ量は液体を消費する量に関係すると考えられる。さらに，ある飲食物に液体をかけて味付けしたり希釈したりする等，注いだ液量は飲食物の風味にも影響を与える。以上より，トクトク感重畳が液体を注ぐ量に影響を及ぼすという結果は本研究の目的である飲食体験の触覚的演出の可能性を示唆したといえる。

本装置の制約の一つに加速度センサの値，つまり装置の傾きに応じた振動提示しかできないことが挙げられる。液体を注ぐ際の演出を考えた際，液体の流出に応じた振動提示が行われるべきである。しかし，本装置は傾きに応じた振動提示を行うため，実際には液体が流出していないにも関わらず振動が提示されることがある。この傾きに応じた振動提示が本実験結果に影響を及ぼした可能性も考えられるが，更なる調査が必要である。

### 5.1.5 まとめ

本研究では，トクトク感重畳による飲食体験の触覚的演出の検討を行った。まず，ペットボトルに装着可能なアタッチメント型トクトク感重畳を開発した。次に，4.3 節で構築した残量を考慮しないトクトク感を提示する振動モデルをペットボトルより液体

を注ぐ動作に適用した。被験者実験より、注がれる水量がトクトク感重畳により有意に減少したことから、トクトク感重畳は注いだ液量を錯誤させる効果があると考えられる。以上より、トクトク感重畳による飲食体験の触覚的演出の応用可能性を示唆した。

本研究は、トクトク感をペットボトルより液体を注ぐ動作に適用することで飲食体験の触覚的演出の応用可能性を検討することを目的に行われた。これはペットボトルで液体を注ぐ際に、徳利から液体を注ぐ際の感覚を重畳したといえる。ペットボトルから液体を注ぐ際、微少な振動とともに、液体の減少により質量が軽くなっていくといった主に2つの注いだ液量に関する触覚手がかりがある。本節では、ここに4.3節より得られた振動モデルを重畳し、被験者実験によって、トクトク感が液体を注ぐ量に及ぼす影響を検証した。本実験結果は、徳利の振動モデルをペットボトルで液体を注ぐ際にも適用できることを示した。

以上より、本研究は誇張表現のうち重畳モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発であったといえる。また、ペットボトルより水を注ぐ際に、同様の動作（徳利より水を注ぐこと）によって生じる振動を重畳することで実感性のともなった液体の流出体験を提供し、飲食体験の触覚的演出の可能性を示した結論づけられる。

## 5.2 Jointonation: 屈伸運動に応じた振動提示による関節材質感変調

本節では関節部の屈伸運動に伴って振動を提示することで関節が異なる材質になったかのような体験を提供するシステム Jointonation の設計・開発について述べる。本システムによって、ユーザはサイエンスフィクションに登場するゴム人間やロボットに視聴覚に加え触覚的にも変身したかのような体験が可能となる。

### 5.2.1 研究背景

ヒトの身体は、筋・腱・骨などといった有機物から構成されている。しかし、我々が身体を動かした時、これらの材質について意識することはない。一方で、サイエンスフィクション作品では、しばしばロボットやゴム人間など身体が人間とは異なる材質で構成されているキャラクターが登場する。たとえ実在しないキャラクターであっても、その身体的特性は極めて興味深く、視聴者の多くが一度はそのキャラクターになってみたいという憧れを抱くだろう。

これまでも、このような特殊なキャラクターの身体を手に入れる体験、つまり変身を実現する方法が検討されている。キャラクターの外見を模倣した服を身にまとうコスプレによって視覚的にそのキャラクターに変身することが可能である。また Microsoft の Kinect 等を利用した身体動作入力装置を用いて、ユーザの身体動作をバーチャル世界のキャラクター（アバタ）に反映させることが可能である。これに加えて身体動作に応じた効果音を提示することで、ユーザの身体像はゲーム内キャラクターに投影され、あたかもそのキャラクターに変身したかのような体験を視聴覚的に経験できる。

本研究は変身体験の質を向上させるために触覚的な変身の実現をすることを目的とする。肘や膝の関節の屈伸運動に伴って振動提示することで関節部分が異なる材質になったかのような体験（関節材質感変調）の実現を試みる。関節の自由度が低く、システムの実装および評価がしやすいといった理由から本研究では肘と膝を選択した。

本項ではまず身体の触覚的特性の変調手法に関する先行研究について述べる。次に関節材質感変調システム Jointonation の設計・開発について述べる。関節材質感変調手法として、1) 周期的な減衰正弦波提示による関節材質感変調手法、および 2) ロボット駆動時の振動提示の 2 つを実装し関節材質感変調を実現する。そして、それぞれの手法について被験者実験によって評価を行う。最後に、本手法のビデオゲーム応用として、ロボットへの変身体験を可能とする没入型 VR システムの設計・開発について述べる。

### 5.2.2 先行研究

身体の触覚的特性の変調の一つに固有受容感覚における錯覚現象を利用したのがある。例えば、肘部に 100Hz 程度の振動刺激を与えることで実際よりも肘が伸展したかのように感じる腱振動刺激伸展錯覚現象がある[18][44]。これは振動刺激によって肘部筋紡錘が興奮することで生じる。この時、鼻をつまむことで鼻が伸びたように感じるキノピオ錯覚が生じることも報告されており[91]、実際にはありえない身体姿勢の体験が引き起こされる。この錯覚を利用して、身体を動かさずに動いた感じを提示するという

リハビリテーションに応用する試みもある[171]。またパワードスーツ[39]のような外骨格装具から力を提示しユーザの運動を補助するものも通常の運動エネルギーでより大きな運動エネルギーを出力できるという点で運動知覚・能力を拡張するシステムであるといえる。以上の先行研究は振動提示や力提示による運動知覚の拡張であるといえる。

また視・聴覚刺激を用いた疑似触覚によって自己の触覚的変調を行うものがある。Higuchi らはクワッドコプタに取り付けられたカメラからの映像をユーザの HMD に提示する Flying Head システムを開発した[56]。Flying Head ではユーザの頭部運動によってクワッドコプタの向きや移動を制御でき、そのスケールを変えることで身体が巨人や小人になったかのような体験が実現できる。また聴覚刺激を用いた場合においても、羊皮紙錯覚(手を擦った際に生じる音の高周波成分を強調すると手のひらが乾いた紙のように感じられる)等を用いることで皮膚の材質感変調が可能である[77]。

一方で、我々は通常自身の身体が他の材質になることは体験できない。そこで本研究では 2 つの振動提示手法によって現実ではありえないが実感性のある体験の実現を試みる。

### 5.2.3 周期的な減衰正弦波提示による関節材質感変調

本項では肘角度に同期した周期的な振動提示による関節の材質感変調システムの設計・開発について述べる。本手法では前節のカチカチ感提示手法と Okamura らの叩き動作に対する振動提示による材質感再現手法[134] (3.2.2 項参照) を利用して関節材質感変調を行う。

#### 5.2.3.1 実装

本手法では振動提示に衝突を再現したインパルス的な振動を用いる。そのため、ヒトの運動のように連続的なものには単純には適応できない。そこで、3.1 節のカチカチ感提示のように運動に合わせて周期的に触覚提示することを考えた。図 5-3 に示すように、肘角度が 10 度変わる度に肘に減衰正弦波振動を提示する。提示する材質感をゴム、木、金属として、減衰正弦波モデルを[134]を参考に決定した(表 5-1)。ただし、衝突速度  $v$  を一定とし、初期振幅  $A$  を固定した。

本手法を実現するためのシステム Jointonation を図 5-5 に示す。本第一試作システムではモーションキャプチャカメラに Microsoft の Kinect, マイクロコントローラに NXP Semiconductors の mbed NXPLPC1768, D/A コンバータに Linear Technology の LTC1660, オーディオアンプに Ramsteme Systems の RSDA202 を用い、ボイスコイル型リニアアクチュエータ (Tactile Labs, Haptuator MkII) を内蔵した装具 (リストバンド) から振動提示を行った。また 5.2.4 項の第二試作および 5.2.5 項の第三試作では、モニタもしくは HMD による視覚提示およびスピーカもしくはヘッドホンによる聴覚提示を行う。

ここでは右肘の材質感変調を行う場合について述べる。まず、本システムはモーションキャプチャカメラがユーザの右肩、右肘、右手の三次元座標をサンプリングレート 30sps で取得する。次に PC がこれらの 3 点から、本手法では肘角度を 5.2.4 節以降の手法では肘屈伸の角速度を計算し、マイクロコントローラに送信する。マイクロコントローラはそれに応じた振動を計算し D/A コンバータを介して振動信号を出力する。そ

して、振動信号はオーディオアンプによって増幅され装具内部のアクチュエータを駆動し、右肘に振動を提示する。

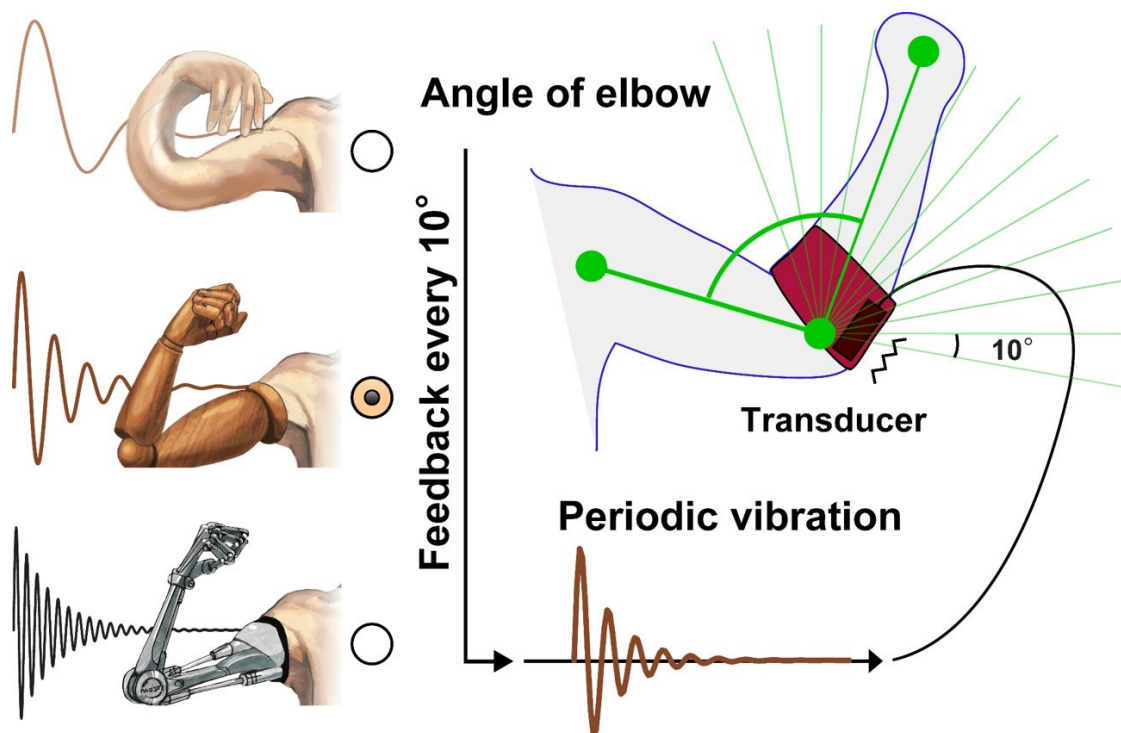


図 5-3 周期的な減衰正弦波提示による関節材質感変調

表 5-1 減衰正弦波のパラメータ

	$A$ [ $m/s^2$ ]	$B$ [ $s^{-1}$ ]	$f$ [Hz]
<b>Rubber</b>	<b>15.1</b>	<b>60</b>	<b>30</b>
<b>Wood</b>	<b>10.5</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
<b>Metal</b>	<b>19.6</b>	<b>90</b>	<b>300</b>

本システムでは肘角度の取得にモーションキャプチャカメラを用いているため、ユーザの腕の動きに対して振動が提示されるまでに約 50 ms という容易にヒトが感じられる遅延が生じ、体験の質を落とす可能性がある。モーションキャプチャにカメラベースのシステムより応答性の高いセンサを用いたり、PC との通信を行わずマイクロコントローラ内でシステムを閉じたりする等で遅延を低減できる。しかし本稿では簡単のために、本システムを用いて実装およびその評価を行った。

#### 5.2.3.2 周期的な減衰正弦波提示による関節材質感変調検証実験

周期的な減衰正弦波提示によって関節材質感変調が可能であるかを検証するために材質感識別課題と主観的な関節材質感を評価する被験者実験を行った。



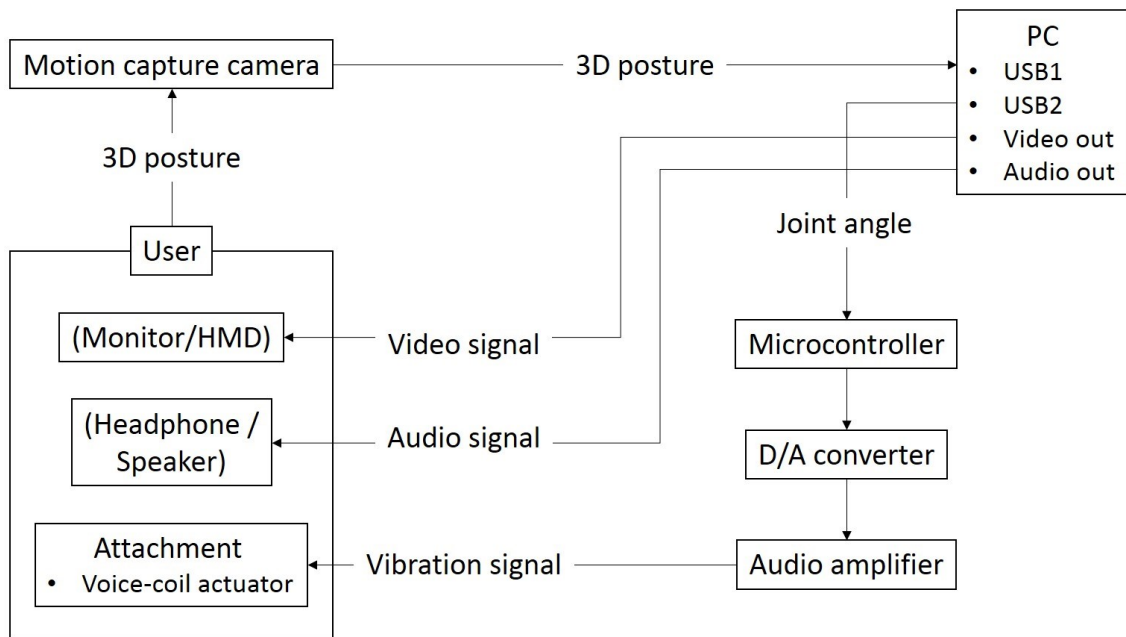


図 5-5 Jointonation システム

#### セットアップ

第一試作システムを用いて実験を行った。ただし、本実験では視覚および聴覚提示は行わなかった。図 5-4 のように被験者は装具を右肘に装着し、モーションキャプチャカメラの正面に立った。

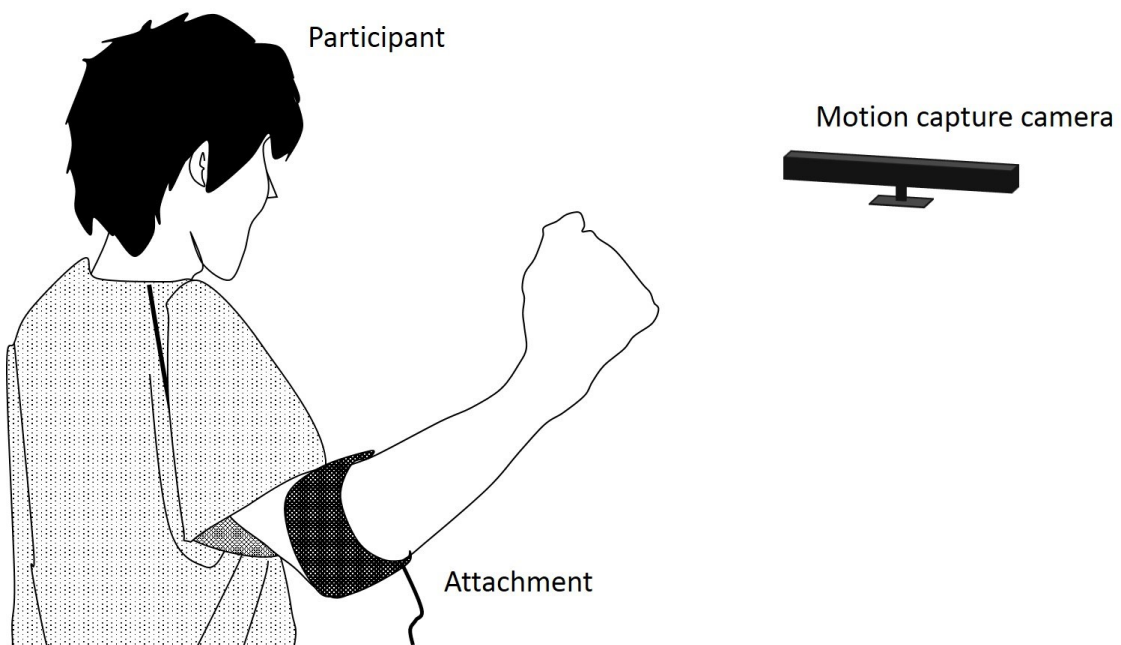


図 5-4 セットアップ

#### 実験手続き

被験者は肘を屈伸するように指示され、肘屈伸に応じて3つの減衰正弦波モデル（ゴム、木、金属）のうちいずれかが提示された。被験者は手元のキーボードを用いて3つ

の減衰正弦波モデルを自由に切り替えることが許可されていた。被験者は3つのモデルに対し、3つの選択肢（ゴム、木、金属）から重複なく回答するように指示された。既に述べたように身体の材質が変わった感覚は通常体験できないため、選択肢を与えない場合には回答が極めて困難であると考え選択肢を与えた。以上を1試行とし、被験者一人あたり3試行を行った。被験者は実験終了まで正答を知らされなかった。また本実験で用いたアクチュエータは振動提示時にわずかな駆動音が生じるため聴覚的な手がかりをもとに材質感を回答する可能性もあったが、ホワイトノイズを提示した場合においても骨伝導によって駆動音が知覚できてしまうので、聴覚のマスキングは行わなかった。

全試行終了後、被験者は以下の二つの質問に対して Yes / No の二択で回答した。

Q1. 振動を腕の内部から感じたか。

Q2. 振動が提示された際、腕に反力を感じたか。

Q1 に関して、本手法によって関節の材質感が変わって感じられれば、関節の内部から振動を感じられるだろうという仮説から質問を設定した。逆に腕の外から感じた場合は外骨格型装具を取り付けたような感覚になると考えられる。Q2 に関して、本手法によって主観的に関節の材質が変わったと感じられれば、普段滑らかに動く関節と比較して抵抗感が生起するだろうという仮説から質問を設定した。

本実験には8名（男性5名、女性3名；22から27歳；全員右利き）が参加した。被験者は全員著者と同一研究室に所属であったが、本手法に対しては未体験であった。

### 実験結果・考察

3つの減衰正弦波モデルに対する被験者の回答率を表 5-2 に示す。全モデルにおいて正答率は80%を超えており、全体での正答率は87.5%であった。各モデルにおける3つの選択肢の回答率に対してカイ二乗検定（比率の差の検定）を行った結果、全モデルにおいて選択肢間の回答率に有意差が認められた（ゴム： $\chi^2(2)=27.00$ ,  $p < 0.01$ ；木： $\chi^2(2)=32.25$ ,  $p < 0.01$ ；金属： $\chi^2(2)=36.75$ ,  $p < 0.01$ ）。したがって、被験者は本手法によって提示した材質を正しく識別できていたといえる。また、ゴムと木が誤って回答されてしまう傾向があり、金属は比較的正しく回答されていた。ただし同様の傾向は Okamura による実験[134]でも観察されており、用いた振動モデルの性質によるものと考えられる。

表 5-2 実験結果：3つの減衰正弦波モデルに対する回答率。  
黄色いセルは正答を示す。

Answer	Vibratory model		
	Rubber	Wood	Metal
Rubber	83.3%	12.5%	4.2%
Wood	8.3%	87.5%	4.2%
Metal	8.3%	0%	91.7%

2つの質問に対して被験者が Yes と回答した確率を表 5-3 に示す。Q1 に対しては全体の回答率は62.8%で、ゴム（87.5%）、木材（62.5%）、金属（37.5%）の順で高かつ

た. Q2 に対する全体の回答率は 70.8%で, Q1 と同様にゴム (87.5%) 木 (75.0%), 金属 (50.0%) の順で高かった.

表 5-3 Q1 および Q2 に対して Yes と回答した確率

Vibratory parameters	Q1	Q2
Rubber	87.5%	87.5%
Wood	62.5%	75.0%
Metal	37.5%	50.0%

振動を腕内部に感じたかを尋ねた Q1 に関して, ゴムおよび木の減衰正弦波モデルにおいて肘関節の内部から振動が感じられ, 逆に金属の減衰正弦波モデルにおいては身体外部から振動が感じられていたことが示唆された. この原因の一つに振動周波数の違いが挙げられる. ゴム, 木, 金属の振動周波数は無毛部においてはそれぞれ主に FA-I のみ, FA-I および FA-II, FA-II のみで受容される (2.2 参照). 一方で, 肘等の有毛部には FA-I が存在せず, 代わりに毛包受容器 (RA) が存在し 100Hz 程度の振動周波数を受容する [125]. したがって, RA が刺激されると振動が腕内部で感じられ, FA-II が刺激されると振動が腕内部では感じられにくいと考えられる. 一方で, 詳細については更なる調査が必要である.

反力を感じたかを尋ねた Q2 に関しては, 本実験ではゴムおよび木の減衰正弦波モデルにおいて金属よりも強い反力を感じるという結果であった. 低周波振動は高周波振動と比較して肘そのものの材質が変わったように感じたとの内観報告より, 反力を感じるほど関節材質感変調に対する主観的な評価が高いという仮説を支持すると考えられる.

本実験では, 被験者が全て著者と同じ研究室のメンバーであり, 触覚提示の知識を有していた. そのため, 被験者は例えば高周波振動が比較的硬い材質感を示すという知識をもっていた可能性があり, 被験者は単純に振動周波数の違いを手がかりに材質を回答していた可能性がある.

一方で実験終了後, 未体験の感覚であるため確信がもてないものの, 肘関節がゴムや木に変わったとように感じたとの内観報告があった. また金属の減衰正弦波モデルに関しては, 金属製の外骨格型スーツを身につけたような感覚がするとの内観報告があった. このことから, ゴムや木においては本節の目的であった関節材質感変調が実現したといえ, 金属に関しては関節材質感変調が実現したとは結論づけられないものの, 金属製の外骨格をまとったかのような体験が実現できたといえる.

#### 5.2.4 ロボット駆動時の振動提示による関節材質感変調

本項では肘角度に同期した周期的な振動提示による関節の材質感変調システムの開発について述べる. 本手法では線形予想符号化を用いて産業用ロボットアームを駆動した時に生じる振動をモデリングし, 肘角度に同期して振動提示することでユーザの関節をロボットのような関節にするという材質感変調を行う.

#### 5.2.4.1 ロボット化とロボット感

今日では iRobot の Roomba のような我々の生活を補助するロボットや, Softbank の Pepper のような我々の感情を認識するヒューマノイドロボット等, 我々の生活において頻繁にロボットが見られるようになった. 一方で, ロボットといえばサイエンスフィクションに登場するような地球外生命体を退治する力強く頼もしいロボットを想像する人も少なくなく, その身体特性は人々の憧れといっても過言ではない. 本項で試みる関節材質感変調ではこのようなロボットへの触覚的な変身 (ロボット化) の実現を目的とする (図 5-6).

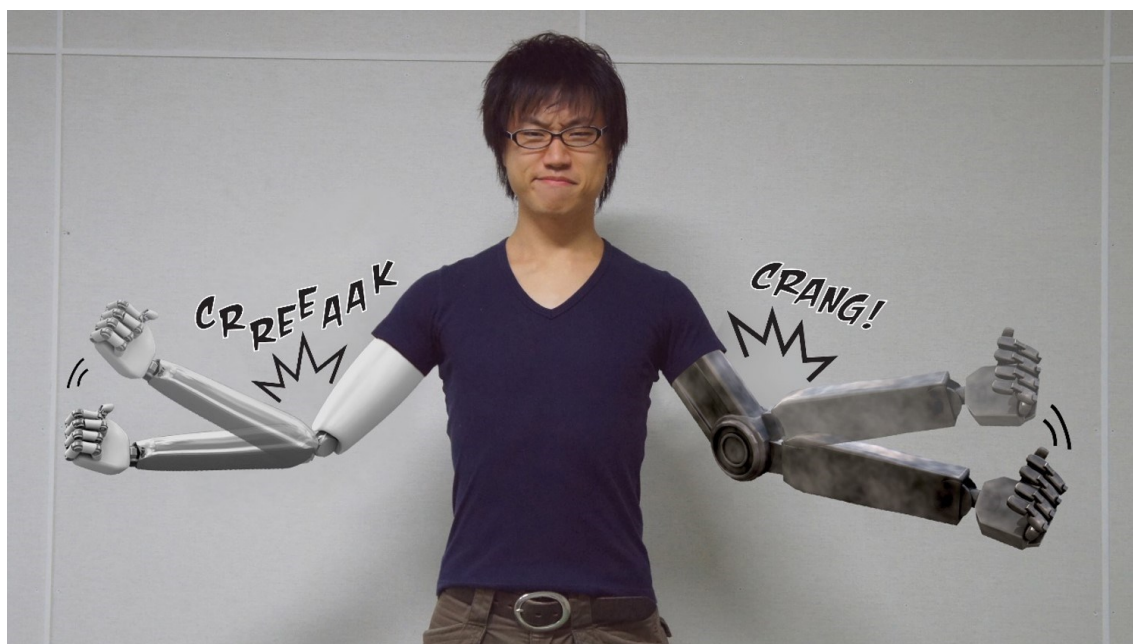


図 5-6 ロボット駆動時の振動提示による関節材質感変調

通常ロボットの身体は金属により構成される. そのため前節で述べた手法より金属の減衰正弦波振動を周期的に提示することでロボット化が実現できると考えられる. しかし, 前項の実験でも示されたとおり, ロボット化というよりは金属製の外骨格を身にまとっているという表現が適切であった.

確かに多くのロボットは金属製の外骨格に覆われているが, ロボットが駆動する時にはモータやギヤ等の機械部品から振動が生じる. しばしばロボットの動きを形容する時に用いられる「ギィー」「ガッシャン」といった擬音語はこのロボット駆動時に生じる振動を表現したものと考えられる. このロボット駆動時に生じる振動こそがロボット化を実現するための本質であると考え, 本論文ではこれをロボット感と定義する.

ロボットを駆動するためのモータやギヤはといった機械部品はその制御の過程で高周波振動を発生する. この振動はロボットに取り付けられた加速度センサやマイクロホン等の機能を妨害する原因となっている. そのため, ロボット工学の分野ではこの高周波振動はノイズとして扱われ, これを低減するための手法が研究されている[69][122].

一方で、ロボット化という観点から考えると、内部機構に起因するこの高周波振動こそがロボット感を実現する触覚的な手がかりであると考えられる。したがって本研究では、高周波振動低減対策がなされていない旧型の産業用ロボットアーム駆動時の振動に着目する。

前項でも指摘したとおり、実際に関節の材質感が変わるという体験は通常ありえない。したがって、ロボット駆動時の振動が正確に再現できたとしても、ユーザに実感性のあるロボット化体験を提供することは困難であると考えられる。これに対し、所望の文脈を与えることで、ロボット駆動時の振動提示に実感性をもたせられると考えられる。本節ではこの文脈を、見た目や効果音といったビデオゲーム等で見られる従来のロボット化手法である視覚および聴覚提示により生成する。これにより、視覚、聴覚そして触覚的なロボットへの変身を実現し、より実感性のある体験の実現を試みる。

#### 5.2.4.2 実装

本手法の実装を、産業用ロボットアーム駆動時の振動の記録、モデルの構築、そして再生の手順で行った。

振動の記録には産業用卓上 6 軸ロボットアーム (Unimation, Unimate PUMA260) を用いた。振動の記録対象となるロボットは様々なものが考えられるが、サーボモータとギヤで構成されたシンプルな機構が比較的大きな振動を発生し、ヒトにとっても知覚しやすいであろうという理由から本ロボットを採用した。図 5-7 に示すように、本ロボットの肘関節に 3 軸加速度センサ (Bosch Sensortech, BMA180 計測レンジ $\pm 16G$ , 解像度 14bit) をホットボンドで固定し、肘関節を 0, 10, 20  $\dots$  80 degree/s の角速度で両方向に 90 度回転させた。0degree/s での回転は静止状態を意味するが、加速度センサはわずかながら振動を検出した。80degree/s より大きい角速度で振動を検出できなかった理由は、本ロボットの最高角速度が 85degree/s 程度であったためである。ロボットの駆動中、肘関節の 3 軸加速度をサンプリングレート 2.5ksps で取得し、マイクロコントローラ (NXP Semiconductors, mbed NXP LPC1768) を介して PC に記録した。またエイリアシング効果を防ぐため、加速度センサに内蔵されている 1.2kHz ローパスフィルタ機能を用いて計測を行った。なおヒトが知覚できる振動周波数帯域は 500Hz 程度までである (2.2 節参照) ため、計測した振動周波数帯域は触覚提示において十分である。

ロボット振動のモデルを構築するため、記録した振動加速度に対して信号処理を行った。まず記録された各軸の振動加速度に対して 20Hz のハイパスフィルタを適用し、ロボットアームの傾きに起因する低周波成分 (重力加速度) を取り除いた。次に各軸の振動加速度を時間領域で加算した。またロボットの回転範囲 90 度の中心となる 45 度付近の 1 秒間分の振動加速度を抽出し、異なる角速度条件で記録されたデータの時間幅を統一した (図 5-8 左)。

本手法ではモデリング方式として音声処理で用いられる線形予測符号 (Linear Predictive Coding, LPC) を採用した。これにより振動加速度のパワースペクトル密度、すなわち周波数特性の再現を試みた (図 5-8 中央)。LPC は主に音声信号の符号化に用いられるが、振動加速度のモデリングにも利用されている [146][147]。振動加速度に対して 10 次の FIR (Finite Impulse Response) フィルタを適用し、最小二乗法を用いて元の振動加速度の周波数特性と可能な限り一致するような LPC 係数ベクトル  $a(k)$  ( $k = 1, 2,$

3, …10) を求めた. 本演算には数値解析ソフトウェア (MathWorks, MATLAB) の lpc 関数を用いた.

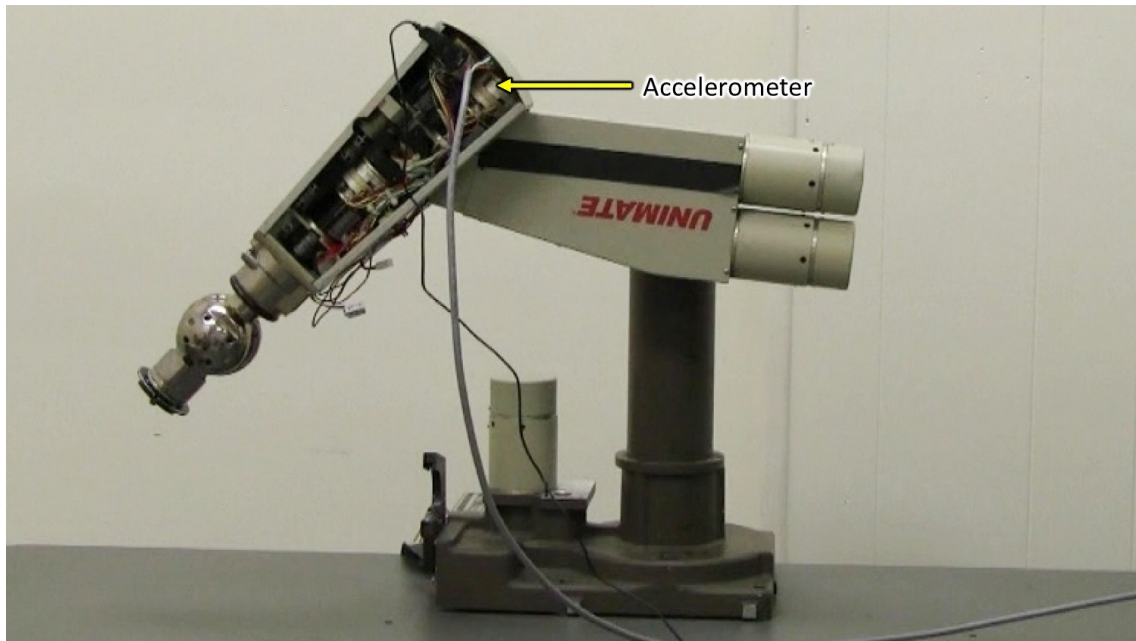


図 5-7 ロボット駆動時に生じる振動の計測

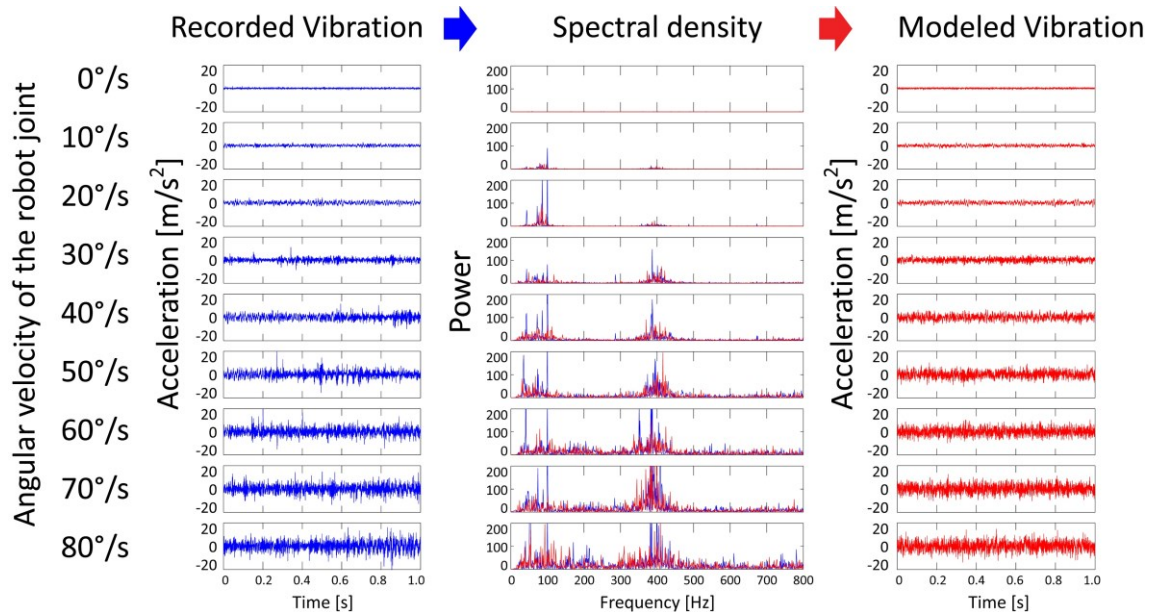


図 5-8 線形予測符号によるモデリング :

左) 計測された振動加速度, 中央) 記録した振動加速度とモデル化した振動加速度のパワースペクトル, 右) LPC でモデリングされた振動加速度.

本モデリングの目的は, 過去の信号 (振動加速度) を用いて現在の信号を予測することである. 現在信号値  $\hat{x}(n)$  は次式より過去の信号から推定することができる.

$$\hat{x}(n) = w - \sum a(k)x(n-k) \quad (12)$$

ここで  $n$  はステップ数,  $x(n-k)$  は  $k$  ステップ過去の信号値,  $a(k)$  は LPC 係数,  $w$  は生成されるホワイトガウシアンノイズの 1 サンプルを表す. 本稿では現在の信号のみ推定ができればよいので,  $n = 0$  が代入される. ホワイトガウシアンノイズにより推定値がランダム性を持つため, パワースペクトルは元のデータを再現しているものの時間領域では一定の波形の繰り返しにならず, 常に新しい信号値を生成するモデルとなる (図 5-8 右).

構築したモデルを利用して振動提示するために第二試作システムを構築した. 本システムは第一試作 (5.2.3 項) と異なる点は装具に内蔵されたアクチュエータにアルプス電気の ForceReactor を採用した点である. また文脈を生成するための視覚提示にモニタを用い, 聴覚提示にヘッドホンを用いた.

肘屈伸の角速度に応じてマイクロコントローラが D/A コンバータを介して信号を出力する. この際, マイクロコントローラはあらかじめ算出しておいた全角速度における LPC 係数のうち肘屈伸の角速度に最も近いをものとホワイトガウシアンノイズを用いて式(12)に基づき推定信号をリフレッシュレート 2.5kHz で出力する. 例えばユーザの肘屈伸角速度が 35-44degree/s の範囲内にある場合は, 40degree/s でロボットを駆動した際の LPC 係数を用いて信号を生成する. 今回は適用される LPC 係数は肘屈伸の角速度に対して一定間隔で閾値を設けた. そのため, 例えばユーザの肘屈伸の角速度が閾値付近になると, チャタリングが生じ適用される LPC 係数が頻繁に切り替わってしまう. この解決策としては閾値にヒステリシスを設定することが挙げられるが, 現状では特に不自然さは感じられなかった. これは本手法で用いているホワイトガウシアンノイズのもつランダム性によってチャタリング現象がマスキングされているためと考えられる.

ヘッドホンからは振動提示と同様の信号を入力して音として (空気伝導で) 提示する. モニタはユーザの正面に設置し, 振動計測時に用いたロボットを表示した. ユーザの肘角度と同じ角度をとるようにモニタ上のロボットアームも動いた.

#### 5.2.4.3 振動提示によるロボット変身体験の実感性向上検証

ビデオゲーム等で見られる視聴覚的なロボットへの変身にロボット駆動時の振動提示という本手法を加えることで, ロボットへの変身体験の実感性が向上するか検証した.

##### セットアップ

本実験では前項で述べた実験と同様のセットアップを用いた. ただし図 5-9 に示すように, ヘッドホンの R チャンネルのみから聴覚提示を行い, モニタより視覚提示を行った. 本実験では感覚提示を 4 条件 (視覚のみ (V), 視覚+聴覚 (V+A), 視覚+触覚 (V+H), 視覚+聴覚+触覚 (V+A+H)) を設定した. このうち従来手法として V+A 条件を基準条件に設定した. また評価項目として, 1) 自分の腕がロボットになったと感じたか (ロボット感評価), 2) 腕に抵抗感を感じたか (抵抗感評価), の 2 つを設定した. 後者に関しては, ロボットへの変身体験からギヤやモータ等の機械部品の摩擦が想起されると考え, 被験者がロボットに変身したと感じれば被験者は擬似的な抵抗感を感じると仮定し設定した.

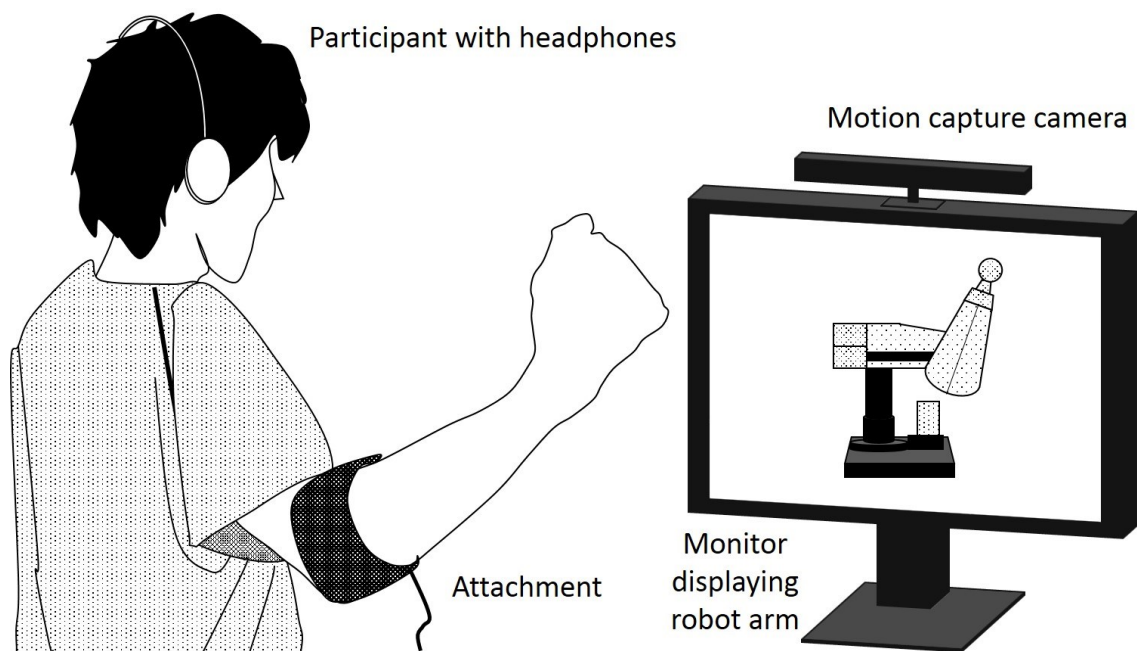


図 5-9 セットアップ

#### 実験手続き

被験者はモーションキャプチャカメラおよびモニタの正面に立ち、装具を右肘に、ヘッドホン (BOSE, QuietComfort 15) を頭部に装着した。実験者は装具のアクチュエータを試験的に駆動し、被験者は右肘に振動刺激を明確に感じるようオーディオアンプのボリュームを調節した。実験者は被験者に対し、モニタ内のロボットアームを注視しながら 15 秒で右肘を様々な速度で屈曲、伸展させるよう指示した。

本実験開始前の練習として、被験者は感覚提示 4 条件を 1 度ずつ体験した。この時、必ず最初に基準条件 (V+A 条件) を体験し、その後残りの 3 条件をランダム of 順で一度ずつに体験した。

本実験では、被験者はまず基準条件を体験し、次に比較条件を体験した。そして被験者は基準条件を 50 とした時の、ロボット感評価を 0 (全くロボットでない) から 100 (とてもロボットになった) のアナログスケールで回答した。また抵抗感評価に関しては 50 を (普段と同じ) とし 0 (とてもスムーズ) から 100 (とても抵抗を感じる) のアナログスケールで回答した。これを 1 試行とし、4 条件全てに対して評価を行った。比較条件の提示順はランダムであった。

本実験には 7 名 (男性 6 名, 女性 1 名; 21 から 23 歳; 全員右利き) が参加した。

#### 実験結果・考察

実験結果を図 5-10 に示す。エラーバーは被験者間の標準偏差を表す。ロボット感評価に対して一要因 (感覚提示条件) 分散分析を行った結果、有意差が認められた ( $F(3, 24)=3.35, p<0.001$ )。また多重比較 (Tukey's HSD 法) を行った結果、V+A-V+H 間では有意傾向が認められ ( $p=0.07$ )、それ以外の全ての対で有意差が認められた ( $p<0.05$ )。また、抵抗感評価に対して同様の分散分析を行った結果、有意差が認められた ( $F(3,$



24)=3.34,  $p<0.05$ ). また多重比較を行った結果, V-V+A+H 間でのみ有意差が認められた ( $p<0.05$ ).

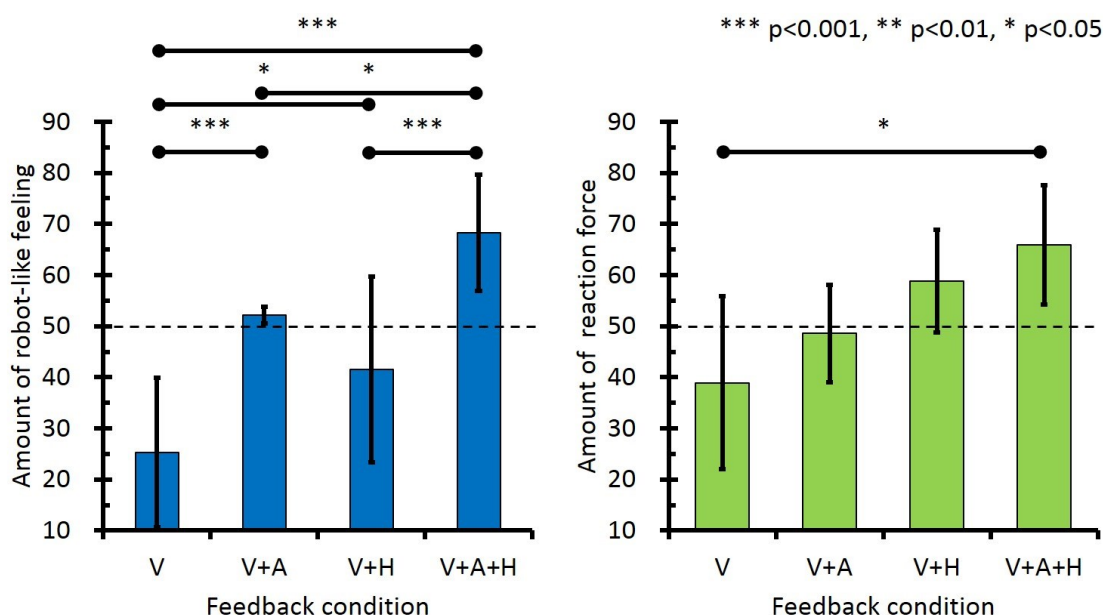


図 5-10 実験結果：左) ロボット感評価, 右) 抵抗感評価.

ロボット感評価に関して, V+A+H 条件が他のどの条件よりも有意に高く評価されていたことから, 従来の視聴覚提示に触覚提示を加えることでロボットへの変身体験の実感性が向上することが明らかとなった. また, 基準条件の V+A 条件においては平均評価値が 52.1 と基準値 (50) に近い値を示した. したがって被験者は基準を正しく理解し, 評価できていたといえる. 抵抗感評価に関して, ロボット感評価と同様に V+A+H 条件で評価が最も高くなった. こちらに関しては, 統計的な有意差は認められなかったものの従来の視聴覚提示に触覚提示を加えることが効果的であったと考えられる.

ロボット感評価を縦軸に, 抵抗感評価を横軸にとり本実験での 84 対の評価値をプロットしたグラフを図 5-11 に示す. 本データに対して線形回帰分析を行った結果, ロボット感評価と抵抗感評価間には弱い相関が認められた ( $R^2=0.425$ ). 本結果はロボット感を抵抗感で一部説明できることを示唆している.

3名の被験者から, 触覚提示がある条件 (V+H および V+A+H) の時は腕にきしみもしくはしびれを感じたという内観報告が得られた. これは, 構築した振動モデルによってロボット駆動時に観察されるギシギシとした摩擦振動が再現でき, それをきしみやしびれとして感じたと考えられる.

以上の実験結果より, 従来手法である視覚, 聴覚提示によるロボットへの変身体験に, 本手法による振動提示という触覚提示を加えることでより実感性のあるロボットへの変身体験が実現できることが示唆された.

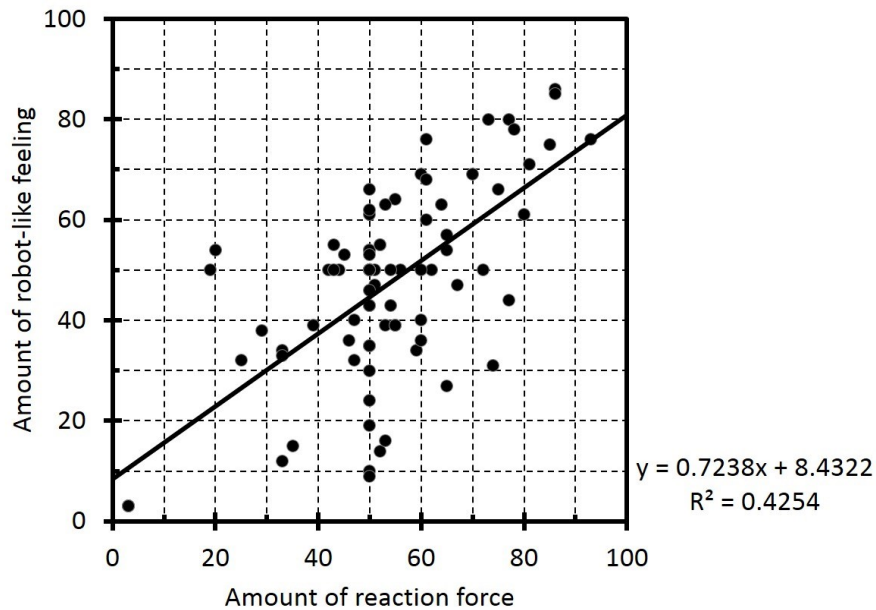


図 5-11 ロボット感評価と抵抗感評価の相関関係

## 5.2.5 没入型ロボット変身体験 VR ゲーム

本節では前節で述べた手法を応用した没入型ロボット変身体験 VR ゲームの設計・開発について述べる。本ゲームでは大きさの異なる 2 種類のロボット（ヒューマノイドロボットおよび巨大ロボット；図 5-13）に変身し、襲いかかるモンスターを殲滅するという体験を提供する。

### 5.2.5.1 実装

前節で用いた第二試作システムは主に本手法の有効性を確認するためのシステムであった。デモ展示等に向けたより実用的なシステムとして第三試作システムを開発した。本システムと第二試作システム（5.2.4 項参照）の異なる点は装具が両肘と両膝用の 4 つとなった点である。また本システムで視覚提示に HMD（Oculus VR, Oculus Rift）を、聴覚提示にスピーカを用いた。したがって本システムはモーションキャプチャカメラによる全身体動作の計測に加えて HMD の頭部位置計測が可能である。

本システムではゲームエンジン（Unity Technologies, Unity）を用いて VR 空間を作成し、その中にユーザのアバタであるヒューマノイドロボットと巨大ロボットを設置した。HMD にはアバタからの一人称視点の立体映像が提示される（図 5-12）。また、ゲームエンジンは VR 空間内で生じる音の生成も行う。

前システムでは、触覚提示の振動加速度をヘッドホンから出力し聴覚提示を行っていた。しかし、この音は多くのユーザが想像するロボットが発する音とは異なっていた。さらに、マイクロホンを使って録音した音を提示した場合も同様にロボットらしさが感じられなかった。したがって、写実的なロボットの駆動音の提示はロボットへの変身体験の実感性向上には効果的ではないと考えられる。



図 5-13 ヒューマノイドロボットと巨大ロボットの3Dモデル

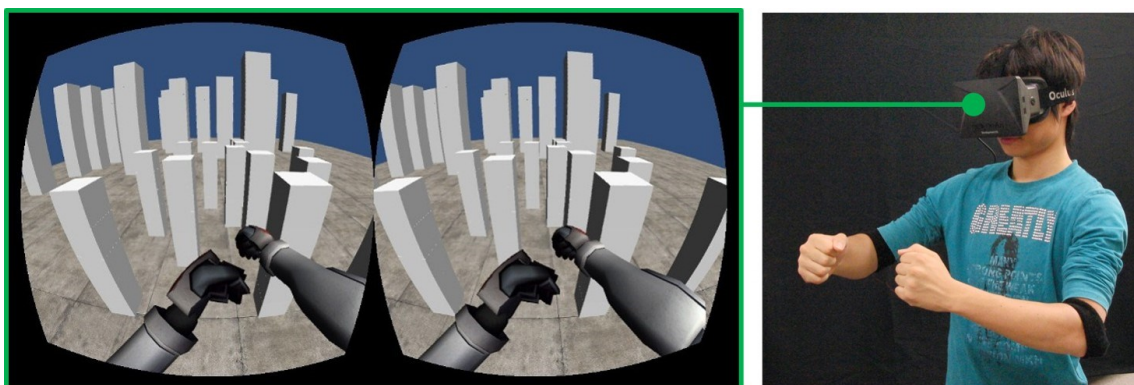


図 5-12 HMDによるアバターからの一人称視点立体映像提示

そこで本システムでは人工的に作られたロボットらしい効果音を用いた 5.2.4 項で述べたとおり，ロボット感はロボットが運動中の「ギィー」と運動停止時の「ガシャン」といった擬音語で表現される．これらに相当する効果音をスピーカから出力した．またゲームエンジンの立体音響機能を用いて，運動している肘，膝関節からその部位の効果

音が聞こえるように設計し、各関節の駆動に起因する音であることを強調した。ヒューマノイドロボットでは効果音の音源を無加工で再生し、巨大ロボットでは効果音の音源のピッチ（周波数）を下げたものを再生することで巨大ロボットの重量感・巨大感を表現した。

前システムの振動提示はロボット感のうち主に「ギィー」に相当するものであった。触覚提示においても聴覚提示と同様に「ガシャン」の再現を行った。5.2.4 項で計測した振動加速度を分析すると、ロボットの関節が回転運動を停止した瞬間から約 0.3 秒間過渡的な大きい振動が計測されていた。したがって、該当の 0.3 秒間の振動加速度値を抽出し、これをユーザの動きが停止した際に提示した。ヒューマノイドロボットには前節で構築した振動モデルを適用し、巨大ロボットには動振動モデルに 300Hz のローパスフィルタをかけたものを適用して振動提示を行った。

### 5.2.5.2 セットアップ

図 5-14 に第三試作システムをセットアップした際の様子を示す。モーションキャプチャカメラをユーザの正面に全身が映る位置に設置する。ユーザの両肘、両膝に装具を固定し、腰に HMD のコントロールボックスが収納されたウエストポーチを装着する。スピーカはユーザの背面に設置する。またユーザの見ている画面を周囲の人が見られるように HMD に表示される映像と同様のものをスクリーンに投影する。

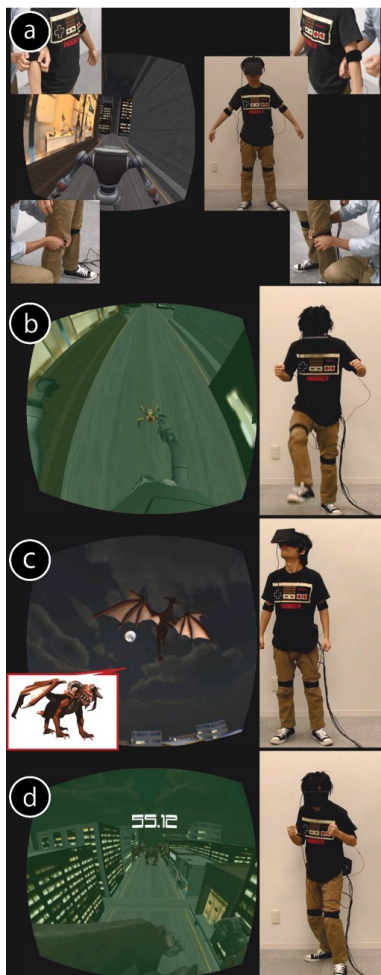


図 5-14 第三試作システムをセットアップした際の様子

### 5.2.5.3 ゲーム設計と体験の流れ

本ゲームの体験の流れを図 5-15 に示す。本ゲームはまず、ユーザがヒューマノイドロボットと一体化するシーンから始まる。次に正面から迫り来る蜂や蜘蛛のモンスターをパンチおよびキック、踏みつけで倒していく。銃火器による攻撃ではなく徒手空拳による攻撃方法に設定した理由は、ユーザがより頻繁に関節を動かすことでユーザに触覚的

なロボットへの変身体験を経験してもらうためである。飛行する蜂はユーザの頭部位置の高さで接近してユーザにパンチ動作を誘発させ、一方で蜘蛛は地面をはって接近しユーザにキックおよび踏みつけ動作を誘発させるように設計した。



The game starts from a synchronization with the humanoid robot.

The player attacks the monsters (flying bees and crawling spiders) by punching and stomping.

When the player beats the initial set of monsters, a giant red dragon descends from the night sky.

After the player is synchronized with the giant robot, the system renders giant-robot-like vibrations and sounds so that the player recognizes that they have a bigger and heavier body.

図 5-15 ゲームの体験の流れ

これらのモンスターを一定数倒すと、上空から巨大なドラゴンが出現する。これを撃退するため、ユーザはジャンプ動作によって巨大ロボットと一体化する。既に述べたとおり、巨大ロボットに変身したユーザはヒューマノイドロボットとは異なる視線位置、振動モデルおよび効果音が提示され、異なるロボットの身体を体験する。また背景にビルが立ち並ぶ市街地を表示し、巨大ロボットやドラゴンがビルと比べてどれだけ大きいかを相対的に感じられるようにした。

#### 5.2.5.4 展示

本ゲームを Advances in Computer Entertainment Technology 2013（オランダ，2013年11月12-15日）および ACM SIGGRAPH Asia 2013（香港，2013年11月19-22日）にて実演展示した。体験者の総数は300人程度であり、体験時間は装具等の装着時間も含め一人あたり5分程度であった。多くの体験者がゲーム中あまり表情を変えず静かに身体を動かし、体験後に笑顔で感想を述べた。これは体験者が本ゲームに深く没入していた

めと考えられる。体験者の反応は「本当にロボットになった」、「関節がギシギシ／ガシヤンガシヤンした」、「没入感が高かった」等、極めて良好であった。

本展示を通じて、セットアップに関して特筆すべき課題として次の 2 つが挙げられる。1) 装具から伸びているケーブルが運動の邪魔となり、断線することもある。2) 振動の強度が十分でない。3) 触覚提示やアバタの運度等に遅延がある。課題 1 および 2 に関して、伸縮性のあるケーブルを用いて極力運動の妨げにならないようにし、より強力な振動提示が行える新たな装具を開発することで解決できる。また、本体件には体験者にキック、踏みつけ、ジャンプ等の膝屈伸による動作を促した。この際に、ケーブルを踏んでしまうことで断線することが多々あった。より安定した展示を考えた際、肘部のみの動作で体験できるシステムを構築する必要があると考えられる。課題 3 に関して、遅延の主な原因はモーションキャプチャカメラのリフレッシュレートや PC におけるパイプラインやソフトウェア処理による遅延等であり、現状のシステムおよび技術では遅延を全く感じさせない体験の実現は極めて困難である。

また、ロボットへの変身体験に関する課題としては、ユーザの想像しているロボット像と異なってしまった場合、実感性に欠ける体験となってしまうことが挙げられる。本項では前項で構築した産業用ロボットアームの駆動時に生じる振動を提示したが、より滑らかに動くロボットや、SF に登場するような現実ではありえないような駆動音、振動を発するものも想像できる。その場合、予期していた体験とのずれから本手法によって実感性を伴わない体験となった場合もあった。この課題に関する解決策は、様々なロボットを駆動させた時の振動をモデリングしたり、サイエンスフィクションで使用されるロボットの駆動音の設計方法を参考に振動モデルを構築したりすることが考えられる。そして、ユーザが想像するロボット感を複数の振動モデルから選択してもらうことで実感性の向上が期待できる。また、適切な文脈を与えることも解決策の一つに挙げられる。例えば、体験の前に PUMA260 ロボットが駆動している映像を提示する等が考えられる。

## 5.2.6 まとめ

本研究では、肘および膝の屈伸動作に応じて振動提示することで関節の材質感を変調するシステム Jointonation を設計・開発した。振動提示手法として、1) 周期的な減衰正弦波振動による材質（ゴム、木、金属）感提示、2) ロボット駆動時に生じる振動提示、といった 2 つを実装し、被験者実験より評価を行った。さらに、本手法の応用として没入型ロボット変身体験 VR ゲームを開発し、実演展示について報告した。以上より SF 等に登場する現実ではありえない材質で身体が構成されているキャラクタへの触覚的変身を実現した。

本研究は SF 等に登場する現実ではありえない材質で身体が構成されているキャラクタへの触覚的変身の実現を目的とした。これに対し、物体を叩いたときに生じる振動およびロボットアーム駆動時の振動を関節の屈伸運動に合わせて提示した。これは屈伸運動に振動を重ねたといえる。通常、我々の身体の材質が変わるということは体験しえない上に、身体を動かすことで生じる振動によって身体の材質を把握することも稀である。一方で、被験者実験および展示を通じて、2 つの関節材質感変調手法および文脈を

付与することで身体の材質が他の材質に変わったように感じられるとの報告が得られた。

以上より、本研究は誇張表現のうち重畳モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発であったといえる。また、関節の屈伸運動時に特定の材質を想起しやすい振動を提示し、適切な文脈を付与することで実感性の伴った触覚的変身が実現できたと結論づけられる。

## 5.3 VacuumTouch: タッチスクリーン上での動作に対する引力提示

本節ではタッチスクリーン上でのユーザの動作に対して引力提示を行う装置 VacuumTouch の設計・開発について述べる。本装置は引力提示によってタッチスクリーン上に摩擦感を重畳する。これにより、例えばタッチスクリーン上に擬似的な引っかかりをつくりだし、ユーザの操作の補助を行う。

### 5.3.1 研究背景

タッチスクリーン研究において触覚提示装置の設計・開発が盛んに行われている。例えば、振動提示によってタッチスクリーン上でクリック感を再現し、操作性を向上させる手法が開発されている[38][105][141][163]。また、触覚提示は操作性のみでなく、タッチスクリーン上に表示された映像等とのインタラクションの質を向上させる。これまでに映像のテクスチャ感[8]や摩擦感[101]を提示する触覚提示装置が開発されている。本論文 4.1 節でも材質感を提示する触覚インタラクションを設計・開発について述べた。

振動感覚を含む皮膚感覚提示は、しばしばタッチスクリーン上での触覚フィードバックに用いられる。力覚を含む固有受容感覚提示はタッチスクリーン上で主にユーザの指を所望の位置に誘導する目的で用いられる。

力提示手法はスクリーンから指に対する力の方向でせん断力、反力および引力の3つに分類できる。Saga らはモータとワイヤを利用してスクリーンの角から指を引くことでせん断力を提示した[149]。一方、反力はスクリーンから指の方向へ作用する力によって提示でき、しばしば機械的なボタンのクリック感を再現するために用いられる[38][141]。また、引力は指からスクリーンの方向へ作用する力によって提示できる。例えば、Weiss らの FingerFlux は指に固定された永久磁石と電磁石により引力を提示する[180]。

既存の触覚提示手法の多くはユーザが把持、装着した装置、あるいはスクリーンや周囲の媒質（空気等）を駆動して触覚提示する。特に後者ではユーザは装置の把持、装着を必要としないため、簡便に触覚インタラクションを体験できるが、従来手法では皮膚感覚と反力の提示に留まっていた。

そこで、本研究はタッチスクリーン上での操作に対して装着・把持を必要とせずに引力提示可能な装置の実現を目的とする。本節では、まず新たな引力提示装置 VacuumTouch (図 5-16) の開発について述べる。本装置は真空ポンプ、エアタンクおよび電磁弁アレイによって構成され、スクリーン上の空気を吸引することでユーザの指に吸引力を提示する。次に3つの GUI アプリケーション (Suction Button, Suction Slider, Suction Dial) の実装について述べる。そして被験者実験より、VacuumTouch の引力提示下におけるダイヤル GUI の操作性を評価する。

### 5.3.2 先行研究

マルチモーダルマウスは HCI 研究分野において触覚（引力）提示を行った最初期の装置の一つである[1]。マルチモーダルマウスは電磁石とソレノイドピンを搭載した PC



マウスであり、鉄製のマウスパッド上において引力と皮膚感覚を提示する。被験者実験よりマウス操作によるターゲット選択課題において、マルチモーダルマウスによってユーザの反応時間が短くなることが明らかとなった。



図 5-16 VacuumTouch : タッチスクリーンにおける真空圧を用いた吸引力提示装置。

FingerFlux はユーザの指に装着された永久磁石とスクリーン下に設置された電磁石アレイから構成される[180]。原理的にはマルチモーダルマウスに類似しているが、FingerFlux は引力だけでなく、反力および振動を提示可能である。さらに FingerFlux はスクリーンに接触した指だけでなく、スクリーン上方にある指にも触覚提示することが可能である。被験者実験より、タッチスクリーンにおけるポインティングタスクで FingerFlux の引力提示によりユーザは手元を見なくとも正確にポインティングが可能になることが示された。このように、FingerFlux は引力提示の HCI における可能性を示したが、ユーザの指に永久磁石を装着する必要があった。

Teslatouch は、指とスクリーンの間に働く静電気力を利用して摩擦感を提示する触覚提示装置である[8]。ユーザは装置を装着する必要はないが、指を動かしている時のみしか触覚を感じられない、提示できる引力が小さいといった制約がある。

上記のような問題を解決しつつ引力提示を行うために、本研究では負の空気圧（真空圧）を利用することを考えた。

Heilig の没入型 VR システム Sensorama はファンによる風を利用した最初期の触覚提示手法のひとつである[61]。ファンは金銭的、エネルギー的なコストが優れており、様々な VR システムの触覚提示に用いられている[20][28][29][86][128][154]が、それらの多くは皮膚感覚もしくは反力を提示するものであり、引力提示については言及されていない。

空気圧制御を用いた別の触覚提示手法としてスピーカを利用するものがある。超音波スピーカアレイを用いる手法では、超音波スピーカから射出される波形の位相を精密に制御することで空中での皮膚感覚および反力提示を行う[21][66]。この手法はユーザが装置の装着を必要としないが、引力を提示することは困難である。また、Hashimotoらはマグネチックスピーカを用いた触覚提示装置を開発した[54]。ユーザにスピーカコーンと手の平が対面するように把持させ、コーンと手に挟まれた閉空間の空気を振動させることで触覚提示を行う。スピーカコーンを数 Hz の低周波で駆動した時、ユーザは手の平に反力と引力を感じる。この手法は引力提示が可能であるが、継続的な引力提示は機構上困難である。

一方、エアコンプレッサと電磁弁を利用した触覚提示手法もあり、その多くは高圧の空気を噴射することで皮膚感覚、反力を提示するものである[3][39][81][161]。例えば、鈴木らは 100 個の噴射口を利用した三次元の視触覚インタラクションシステムを開発した[161]。他に空気の渦輪をつくって空気のかたまりをユーザに衝突させることで触覚提示する空気砲を利用した手法も開発されている[48][155]。空気砲による触覚刺激は空気噴射と比較して空間的により収束しており、離れた距離に提示できる利点をもつ。しかし、空気噴射と同様に引力提示は困難である。

空気の吸引を利用した触覚提示手法も既に開発されている[116][141]。しかし、これらの目的は引力提示ではなく、十分に小さい面積で皮膚を吸引した際にユーザはそれを「押された」と感じる錯覚現象[116]を利用した皮膚感覚提示である。

この他に、ClaytricSurface[120]、Haptic Canvas[193]および Jamming User Interfaces[40]等の真空ポンプと電磁弁を利用したインタラクティブシステムもある。しかし、これらは空気もしくは液体を吸引することでディスプレイ内部の粒子・流体の密度を制御してディスプレイの硬さや形状を制御することが目的であり、反力や引力の提示は行っていない。

Yamaokaらは空気の吸引圧を利用して、粘着テープに指を押し当てたり、引き離したりしたときの粘着感、および表面をなぞった際の摩擦感を再現した[189][190]。提示装置の性能評価実験や被験者実験より、接着剤や粘着テープに触れた際の触感が再現できること確認した。一方で、本研究の目的であるタッチスクリーン上での操作に対する引力提示については言及されていない。

### 5.3.3 VacuumTouch

#### 5.3.3.1 構造

図 5-17 に示すように、VacuumTouch のプロトタイプはスクリーンにうがたれた吸引口に接続された多数の電磁弁アレイ、エアタンクおよび真空ポンプより構成される。一般的な真空ポンプ（ダイヤフラム型）は脈動が発生するため、振動等の所望でない触刺激が生じる恐れがある。そこで本機では、回転翼型のドライ真空ポンプ（佐藤真空株式会社、ODF-50W）を用いた。真空ポンプは容量 5.5 リットルのエアタンクにエアチューブを介して接続した。このエアタンクは空圧を一定に保つためのバッファとして用いる。エアタンクはスクリーン上に配置された 25 個の吸引口に、エアチューブと 25 個の電磁弁（Amico, VX2120-X64, DC12V (10.2W), 通常時閉）を介して一対一で接続した。ス

クリーン上の吸引口の直径は 9.728mm であり、ヒトの指の腹で十分に覆うことができる。電磁弁の開閉はマイクロコントローラ (NXP Semiconductors, mbed NCP LPC 1768) より SPI 通信によってシフトレジスタ (東芝, 74HC595) および FET (Field Effect Transistor, TO220) を介して制御した。なお、本プロトタイプでは電磁弁の制御はオンオフ制御のみである。

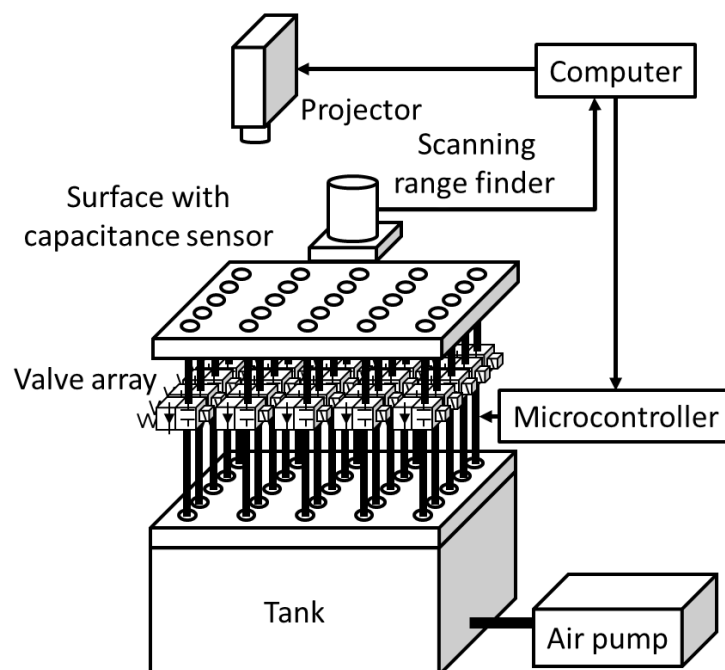


図 5-17 プロトタイプシステム

### 5.3.3.2 性能評価

エアタンクに取り付けた真空計の計測より、エアタンク内のゲージ圧は最大でおよそ 0.085MPa となった。電磁弁が開放された吸引口において、指がその吸引口を完全に覆っている際、指の腹にはおよそ 6.3N (640gf) の引力が提示される。1 つの電磁弁および吸引口が連続的に開放された場合、エアタンク内のゲージ圧は 0.030MPa まで減少する。さらに 2 つ、3 つと電磁弁 (吸引口) を開放すると、ゲージ圧はそれぞれ 0.015MPa, 0.008MPa まで減少する。3 つ以上の電磁弁 (吸引口) が開放状態になると、引力は感じにくくなる。予備的な検証において 0.015MPa のゲージ圧があれば指を吸引口に固定する程度の引力提示が可能であった。しかし、指をスクリーン上でドラッグしている場合や指がスクリーンより少し浮いている場合等の条件の違いや、ヒトが主観的に引力と感じる閾値に関しては更なる調査が必要である。

本プロトタイプにおいて最も大きい音を発生させる構成部品は真空ポンプであり、ユーザのいる場所において 63dB(A) の音圧が生じる。なお、電磁弁の開閉時にも音が生じるが、聴覚のクロスモーダル効果より主観的に引力を強める効果があると考えられる。

### 5.3.3.3 遅延評価

マイクロコントローラは全 FET のスイッチングを 1ms 未満で制御することが可能であるが、電磁弁の駆動時間や、スクリーン上の空気が吸引口からエアタンクに引かれるまでにかかる時間等により、引力がスクリーン上で発生するまでには遅延が生じる。図 5-18 に示す設備構成を用いて、マイクロコントローラの指令から引力が生じるまでにかかる遅延を評価した。

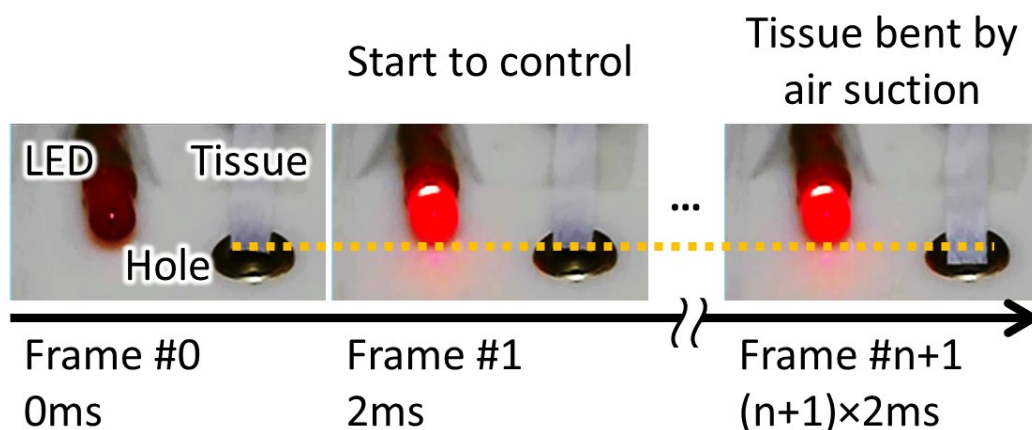


図 5-18 マイクロコントローラの指令から引力が生じるまでの遅延評価実験：  
n は高速カメラ (500fps) のフレーム数

短冊状のティッシュペーパーを吸引口に固定し、近傍に LED を設置した。まず、真空ポンプを連続駆動したまま、LED は消灯状態に、電磁弁は閉鎖状態にした (図 5-18 左)。次に、マイクロコントローラから LED 点灯と電磁弁開放の指令を同時に出力した (図 5-18 中央)。一定時間経過の後、生じた引力によりティッシュペーパーの先端が吸引口へと引かれた (図 5-18 右)。この一連の様子を 500fps の高速カメラで撮影し、LED が点灯してからティッシュペーパーの先端が完全に吸引口へと引かれるまでのフレーム数 (図 5-18 における n) を計測した。10 回の計測の結果、遅延は 4 から 6 フレーム (平均 5 フレーム)、およそ 10ms であった。同様の手順でマイクロコントローラの指令から引力が消失するまでの時間を計測したところ、遅延は 40ms であった。なお、遅延の改善に関する考察は 5.3.7 項で述べる。

### 5.3.4 システム構成

図 5-19 に示すように、本システムのタッチセンサはスキャニングレンジファインダ (北陽電機株式会社, URG-04LX-UG01) によるスクリーン平面上の指先位置の計測と、静電式タッチスイッチ (全面単一電極) によるスクリーンへの指先の接触検知を組み合わせている。また、スクリーン上方には画面表示用のプロジェクタが固定されている。

まず、タッチセンサがユーザのタッチ入力 (指先位置および接触状態) を計測し、それをホスト計算機に送信する。次に、ホスト計算機はタッチ入力に応じて投影映像および電磁弁開放の指令をそれぞれプロジェクタおよびマイクロコントローラに送信する。図 5-19 に示すように、本システムのスクリーンは ABS 樹脂のプレートであり、280×

180mm のワークスペースと 5×5 の引力提示用の吸引口をもつ。なお、使用したスキャニングレンジファインダの制約から、本システムのリフレッシュレートは 10Hz である。より高速なリフレッシュレートが求められる場合、赤外線遮断方式のタッチパネルや、高速カメラによる指先画像処理との組み合わせも可能である。

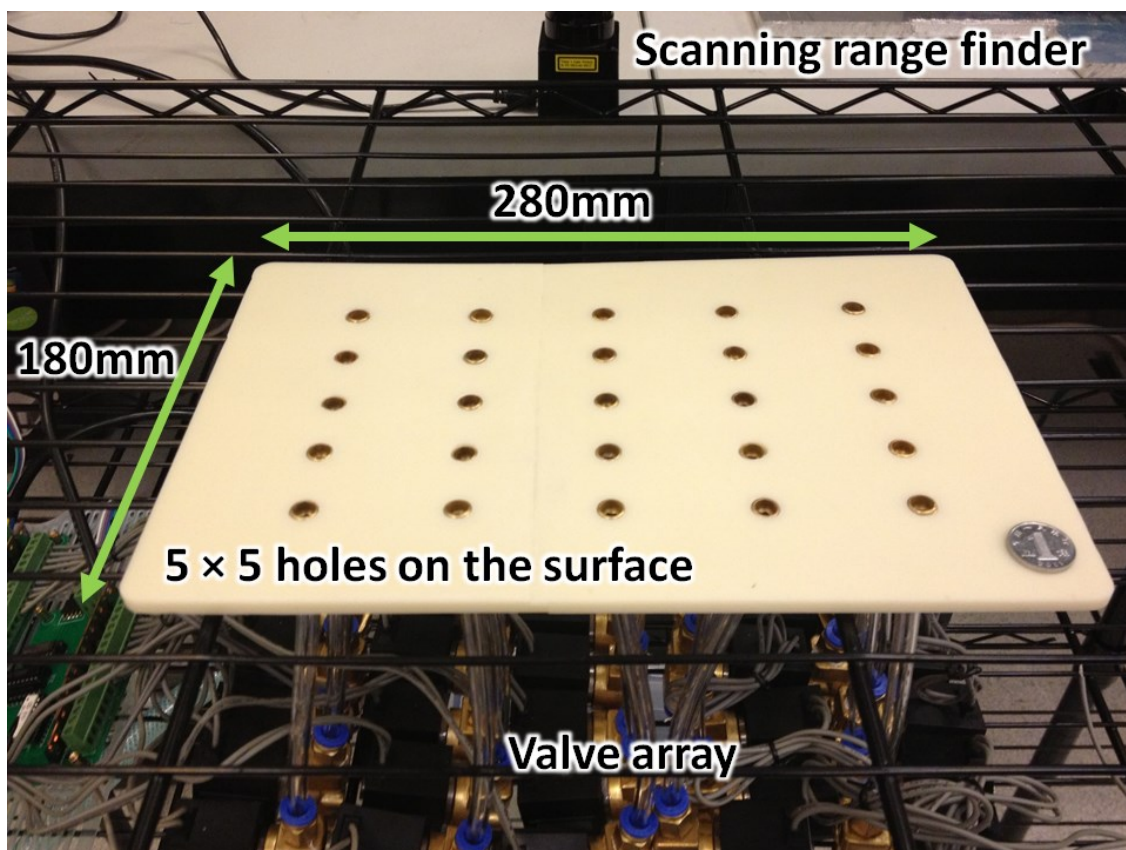


図 5-19 VacuumTouch プロトタイプシステム：  
ワークスペースは 280×180mm，吸引口は 25 (5×5) 個。

### 5.3.5 アプリケーション

引力を用いたインタラクションとして、真実の口（嘘をつくとき指が抜けなくなる）のようなエンタテインメントシステムが考えられる（図 5-16）。特に本システムはユーザに装置の装着を必要とせず簡便に視触覚インタラクションを提供できるため、このようなシステムに向いていると考えられる。しかし、エンタテインメントシステムの客観的、定量的評価は容易ではなく、本システムの有効性検証に用いるのは適切ではない。

一方で、従来の GUI に対して引力提示を加えた場合には、実用的な効果（使いやすさの向上）が期待でき、従来の評価手法と比較することで有効性を検証することが可能である。以下本項では VacuumTouch を用いた 3 つの GUI アプリケーションである Suction Button, Suction Slider および Suction Dial について述べる。

### 5.3.5.1 Suction Button

図 5-20 上に Suction Button の例を示す。ここでは、システムがユーザにシステムファイル等の重要なファイルを削除しても良いか(” Yes” もしくは” No”)を尋ねている。ユーザの入力は該当のボタンを 2 秒間押し続けることで行う(この間に指をスクリーンから離せば入力を取り消すことができる)。

システムは対象のファイルが重要であることを把握しているので、削除「しない」ことを推奨する。したがって、システムは” No” ボタンに引力提示を行う(5.3.7 項で述べるエアコンプレッサを用いた反力提示機構と組み合わせれば、” Yes” ボタンに対して反力を提示し、警告することもできる)。

### 5.3.5.2 Suction Slider

図 5-20 中央に Suction Slider の例を示す。ここでは、ユーザは右端もしくは下部のスライダーで画面をスクロールしながら長い文書を読んでいる。ユーザの注意はスライダーよりも文書の内容に向けられており、このような状況下では、ユーザはよくスライダーが終端に既に来ているにも関わらず指をドラッグし続けてしまい、結果として不快感を覚えることとなる。Suction Slider はスライダーが終端までドラッグされた際、引力提示により強制的に指を止める。ユーザは指がスライダの終端に衝突したような感覚を覚えるので、スライダーを注視し続けなくても文書終端に到達したことが分かる。

### 5.3.5.3 Suction Dial

ダイヤル GUI はアラーム設定等、多くのタッチスクリーンアプリケーションに用いられている。ダイヤル GUI の問題点の一つに、前述のスライダーと同様に、ダイヤルの終端が分かりにくいということが挙げられる。既存の終端報知用フィードバックとしては、視覚的バネ効果(ダイヤルが終端に到達した後も同方向にダイヤルをスクロールすることができるが、指を離した瞬間にダイヤルが本来の終端位置に戻るといったアニメーション)がある。しかし、これは現実の物理ダイヤルでは起こりえない。

より現実の物理ダイヤルに近い GUI を実現するために、図 5-20 下に示す Suction Dial を実装した。ダイヤルが終端に来た際、VacuumTouch が引力を提示することで、ユーザが指を同方向に動かさないようにする。

これまでも静電気力[8]やスクイーズ効果[22][186]を利用した摩擦を制御する手法が開発されており、GUI にも用いられているが、指を強制的に止めるほどの力は提示できなかった。一方で VacuumTouch は、運動中の指を強制的に止めるほどの吸引力を提示できるため、より現実のスライダやダイヤル機構に近い操作を実現できる。

## 5.3.6 引力提示によるダイヤル GUI の操作性評価実験

VacuumTouch の引力提示によって GUI の使いやすさがどの程度向上するかを検証するために実験を行った。本実験ではダイヤル GUI を用いた。被験者に与えた課題は可能な限り早くダイヤルの終端を見つけるというものであった。本課題によってダイヤル終端を教示する既存手法と比較して引力提示がインタフェースとしてどれほど使いやすいかを定量的に評価する。

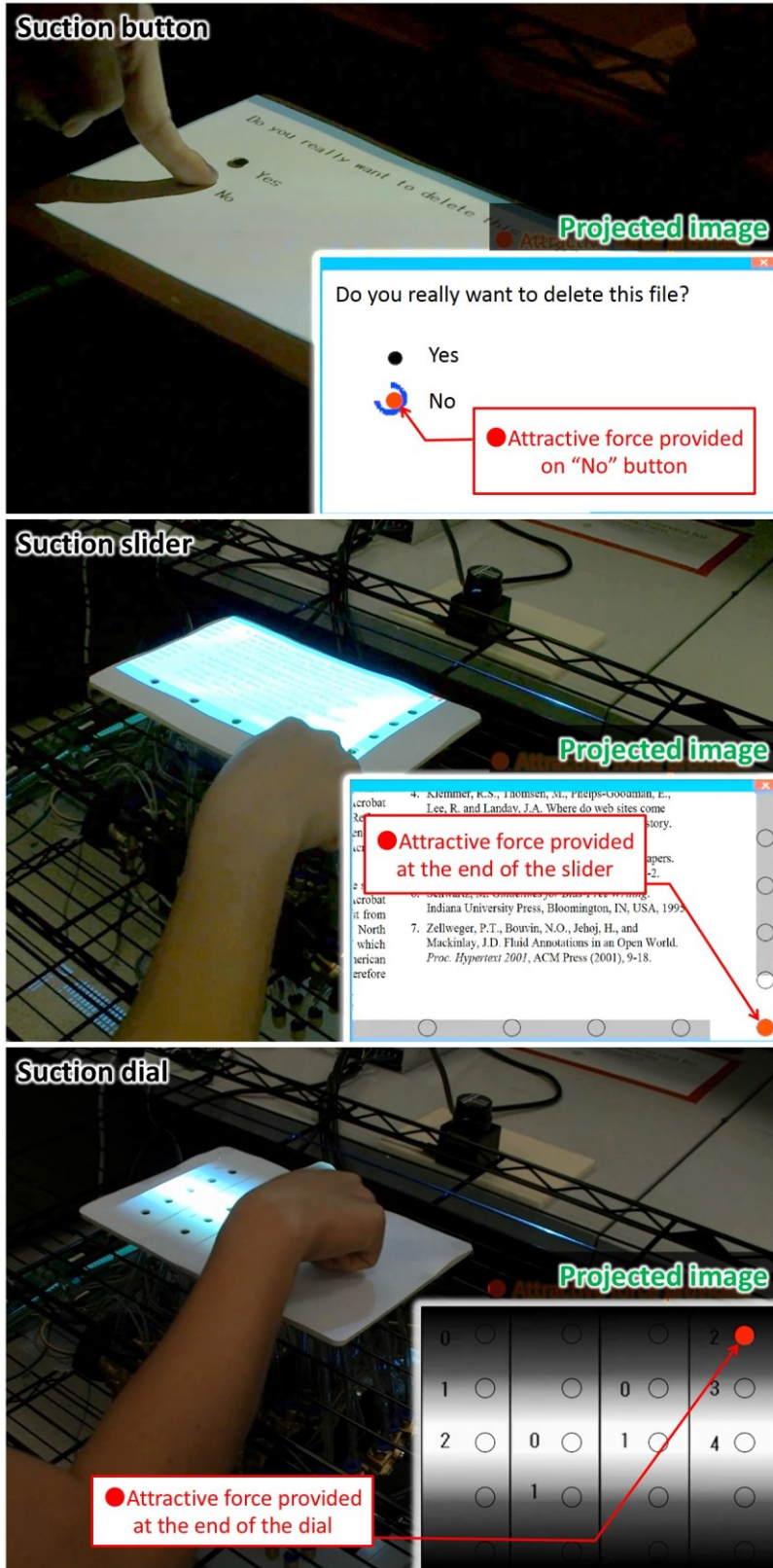


図 5-20 3つの VacuumTouch の GUI アプリケーション：  
 上) Suction Button. 中央) Suction Slider. 下) Suction Dial.

### 5.3.6.1 セットアップ

引力提示が課題に及ぼす影響を調査するため、システムの一部の再設計した。

ダイヤル GUI は視触覚のドラッグインタラクションによって構成される。視覚インタラクションに関して、Ng らは遅延が 1ms しか生じない高速タッチスクリーンを開発し、被験者実験により、ユーザはドラッグインタラクションにおいておよそ 10ms の遅延を知覚することができ、さらに低遅延を好む傾向にあったことを明らかにした[112]。触覚インタラクションに関して、許容される遅延はインタラクションの種類によって異なる。例えば押し動作による硬さ弁別に関しては 5ms の遅延が硬さ知覚に影響を及ぼすこと[131]や、テクスチャ感提示においては 40ms の遅延がテクスチャ知覚に影響を及ぼすこと[133]が知られている。一般的に、触覚インタラクティブシステムは 1kHz 以上のリフレッシュレートをもつことが望ましいとされている。しかし、本システムのリフレッシュレートはスキヤニングレンジファインダの制約から 10Hz である。また、一般的に使用されているタッチパネル機構や、画像処理によるタッチスクリーン機構のリフレッシュレートは 30 から 120Hz であり、フィードバック条件間の差を観察するための時間解像度としては低すぎる。

本実験では、分析に必要な 1kHz のリフレッシュレートをもつタッチセンサを構築した。センサの構成および原理をそれぞれ図 5-22 および図 5-21 に示す。横一列に並べられたフォトリフレクタ (Lite-On Technology Co., LTH-1550-01, 8.7mm ピッチ) アレイによって指先で反射された赤外線光を検知し、指の位置計測を行った (計測範囲: 208.8mm, 計測ピッチ: 4.35mm (2 つのフォトリフレクタ間の補完による), 計測可能距離: センサから 20-30mm 程度)。また、指とスクリーンの接触検知にはインバータ蛍光灯 (20kHz 駆動) の電気ノイズを利用した高速電磁誘導式タッチスイッチ (図 5-22 の銅箔部分, 単一電極) を用いた。これら 2 つのセンサを組み合わせることで、ユーザのドラッグ入力 (指先位置および接触の有無) を 1kHz のリフレッシュレートで計測した。なお、本タッチセンサは一次元方向かつ単一指の計測しかできないが、本実験に対しては十分である。

本実験では、200×200mm の ABS 樹脂のプレート中央横一列に 5 個の吸引口を設けた。吸引口の直径および間隔はそれぞれ 9.728mm および 36mm であった。図 5-22 に示すようにタッチセンサを固定し、フォトリフレクタアレイの上面を ABS 樹脂で覆い、ダイヤル (数字) の映像を投影した。本実験では被験者の指は直接ダイヤル GUI には触れないため、被験者は指で映像を遮蔽することはなくダイヤルの数字をはっきりと見ることができた。ドラッグ入力をしやすくするために、薄いプラスチックシートを電磁誘導式タッチスイッチに沿って固定して摩擦を低減させた。なおダイヤルの数字同士の間隔は 36mm (吸引口の間隔と等しい) であった。

また、試行完了用のタクトスイッチをスクリーンの右側に、振動提示用の振動モータをスクリーンの背面に固定した。振動モータの加速度を加速度センサ (山一電機, Yamco 110B および 4101) を用いて計測したところ、最大振幅および周波数はそれぞれ 0.5G (4.9m/s<sup>2</sup>) および 130Hz であった。また振幅は通電から 100ms 後に定常状態となった。



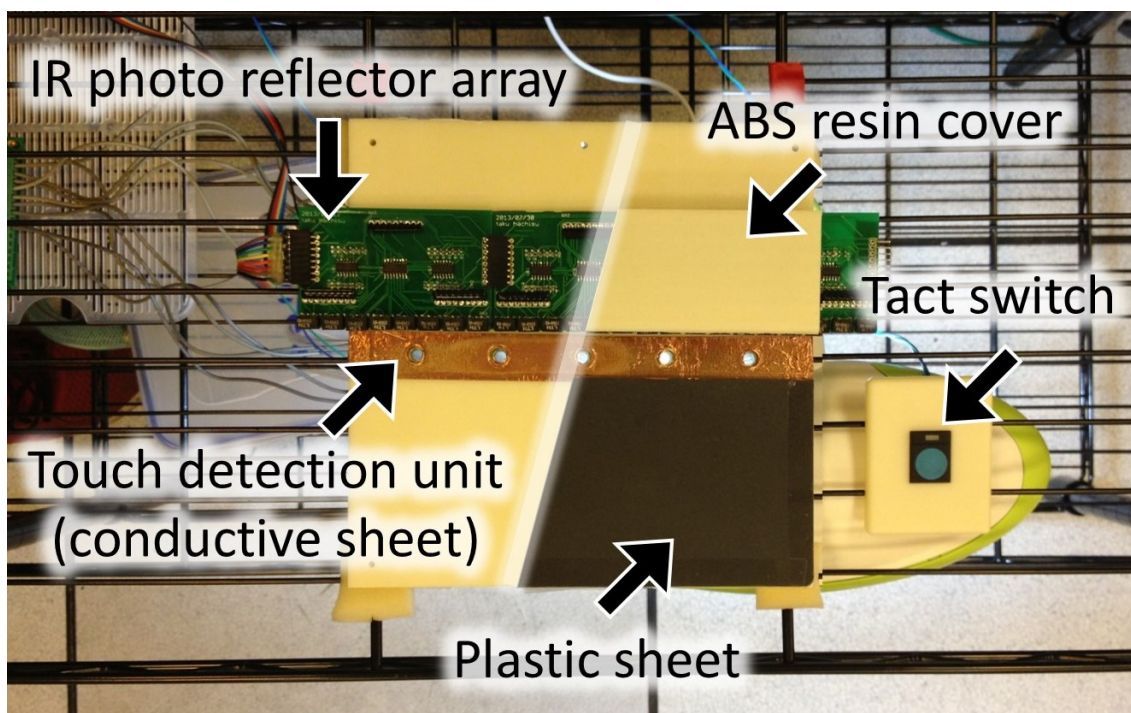


図 5-22 実験設備構成

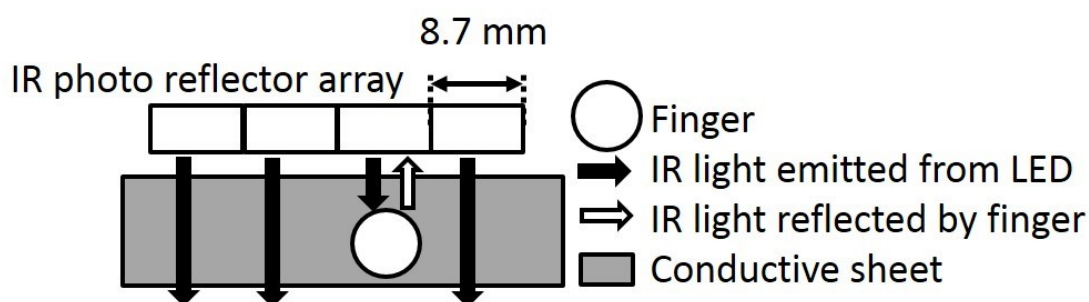


図 5-21 タッチセンサの原理：

フォトリフレクタアレイおよび電磁誘導式タッチスイッチ。

### 5.3.6.2 実験設計

予備実験（図 5-23 左）において、ダイヤルの 5 つの数字を各吸引口の上に投影し、被験者にドラッグ操作によってダイヤル終端の数字を黒い四角（ターゲット）に入れるように指示したところ、いくつかの問題が生じた。まず、被験者はダイヤルのスクロールをドラッグではなくフリック入力で行う傾向にあった。これは、被験者の多くがスマートホンによるフリック入力に慣れていたので、最小の動作でダイヤルをスクロールしようとしたためと考えられる。この場合、指は吸引口まで到達せず接触しないので引力提示を行うことができない。また、被験者が映像に注意を向けすぎてしまったことも挙げられる。ダイヤルの終端がターゲットに入る前に見えてしまったため、被験者は触覚的な手がかりを無視しても簡易に課題が遂行できてしまった。

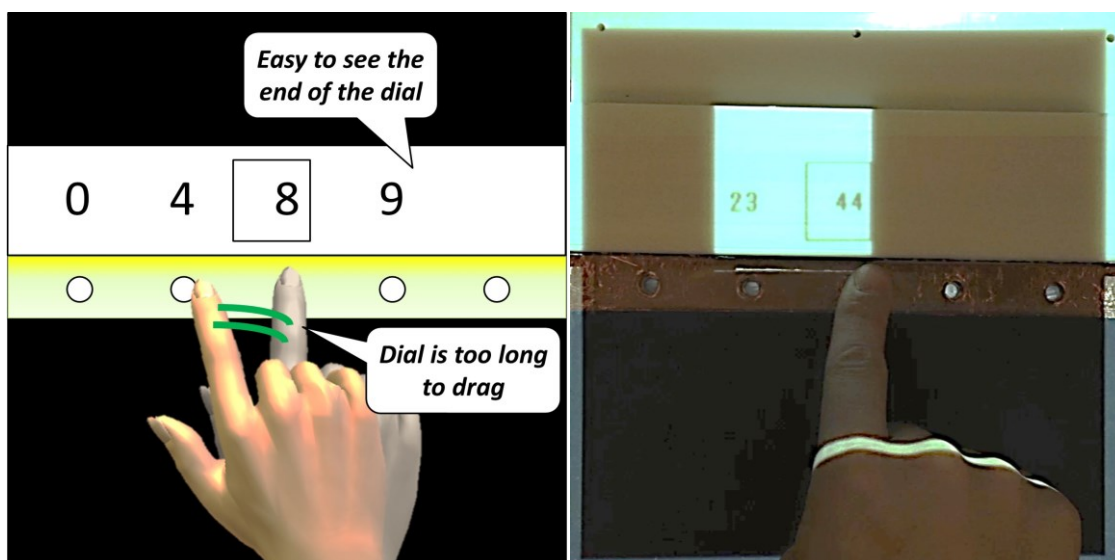


図 5-23 左) 予備実験設備構成 (5つの数字を投影),  
右) 本実験設備構成 (2つの数字を投影)

予備実験で明らかになった問題点を解決するために、本実験 (図 5-23 右) ではダイヤルの2つの数字だけを投影するとともに、確実にドラッグ入力された時のみダイヤルの数字が動くようにした。この設計においては、被験者はしっかりとドラッグ入力を行うようになり、ダイヤル終端で引力提示することができた。さらに、ダイヤルの終端を予想することができないため、ドラッグ中における引力提示の効果を安定して観察することができた。

本実験では4つのフィードバック条件を設定した。1つ目の条件はフィードバックなし (No Feedback, NF) 条件であり、ダイヤル終端がターゲットに入ったあと同方向にドラッグしてもダイヤルは動かなかった。2つ目は引力提示 (Attractive Force, AF) 条件であり、ダイヤル終端がターゲットに入ってから指がスクリーンから離されるまでの間引力が提示された。3つ目は視覚的バネ効果 (Visual Spring, VS) 条件であり、ダイヤル終端がターゲットに入った後も、ダイヤルをスクロールすることができた (視覚的には、ダイヤルの端のブランクが見える) が、被験者が指を離すとダイヤルの終端がばねのようにターゲットに戻った。4つ目は振動提示 (Vibration: VB) 条件であり、引力提示 (AF) 条件と同様のタイミングで振動モータによって振動が提示された。

本実験では5つのダイヤル長さ条件 (4, 6, 8, 10, 12 個の数字がダイヤルに含まれる) を設定した。試行開始時、ダイヤルの左始端は“0”でありダイヤルを左にスクロールするとダイヤルの数字は増加した。ダイヤル右終端の数字は11から99の間でランダムに選択され、中間の数字も重複のないようにランダムで選択された。

したがって、本実験の条件数は合計 20 (4つのフィードバック条件×5つのダイヤル長さ条件) であった。本実験で収集したデータは課題遂行時間および誤試行 (ダイヤル終端がターゲットに入っていない) 数であった。実験の様子はビデオカメラで撮影され、実験終了後に被験者はアンケートに回答した。

### 5.3.6.3 実験手続き

被験者はスクリーンの前に着席し、ダイヤルのスクロール方法の指示を受けた。被験者は人差し指の腹を中央の吸引口の中心に置き、指の腹を左隣の吸引口の中心までドラッグし、指をスクリーンから離すことでダイヤルをスクロールし数字を増加させるように指示された。また、被験者はフリック（左隣の吸引口に到達する前に指をスクリーンから離す）入力をしないように指示された。

被験者は最大値（ダイヤルの終端）がターゲットに入ったと判断したら、スクリーン左側のタクトスイッチを押して試行を完了させた。この試行を可能な限り早く行うように指示された。

本実験は4ブロックから構成された。各ブロックには1つのフィードバック条件が割り振られた。1ブロックは、被験者が割り振られたフィードバック条件でまず15試行を行うトレーニングセッション、および続いて15試行を行うテストセッションから構成された。ダイヤルの長さ5条件はランダムに選択され3度ずつ提示された。被験者は全4ブロックの試行を行った。ブロック（フィードバック条件）の順番は被験者ごとに異なり、全体を通して統制されていた。課題試行中はAF条件およびVB条件で生じる音をマスキングするためにイヤホンを通してホワイトノイズが提示された。本実験ではテストセッションのデータ（課題遂行時間および誤試行数）のみを記録した。

4ブロックの試行終了後、被験者は次に示す5つの質問および自由記述を含むアンケートに回答した。

- Q1 VB条件中、ダイヤル終端で振動を感じたか。
- Q2 AF条件中、ダイヤル終端で引力を感じたか。
- Q3 VSは課題遂行に対してどのように影響したか。
- Q4 VBは課題遂行に対してどのように影響したか。
- Q5 AFは課題遂行に対してどのように影響したか。

Q1およびQ2は、被験者が触覚手がかりを感じていた頻度を調査する目的で設定された。被験者は5段階リッカートスケール（1：全く感じなかった-3：時々感じた-5：常に感じた）で回答した。Q3、Q4およびQ5は各フィードバック条件に対する被験者の嗜好を調査する目的で設定された。被験者は7段階リッカートスケール（1：とても悪かった-4：良くも悪くもなかった-7：とても良かった）で回答した。

本実験には24名（男性20名、女性4名；20から28歳；全員右利き）が参加した。

### 5.3.6.4 仮説

本実験結果に対して次の3つの仮説を立てた。

- H1 AF, VB, VS, NF条件の順で課題遂行時間が長くなる。

H2 NF 条件で誤試行率が最も高くなる。

H3 AF 条件が最も好まれる。

H1 に関して、触覚フィードバックなしの条件 (NF および VS) ではダイヤル終端を確認するために少なくとも余計に 1 スクロール分の動作が必要であるため課題遂行時間が長くなると予想した。さらに、AF 条件では被験者の指がダイヤル終端で強制的に止められるので即座にタクトスイッチを押すことができる一方で、VB 条件では被験者は振動を無視あるいは見逃してしまい余計なドラッグ入力をしてしまうと考えられる。以上の理由より、VB 条件での課題遂行時間は AF 条件よりも長くなると予想した。また NF 条件で VS 条件より課題遂行時間が長くなってしまう理由は、NF 条件ではタッチセンサがドラッグ入力を検知できなかった場合とダイヤル終端とを見分けることが困難なためである。同様の理由から H2 を予想した。H3 に関して、AF 条件は現実の物理ダイヤルのようにダイヤル終端で指を止めるので被験者は直感的に操作できると考えられ、最も好まれると予想した。

### 5.3.6.5 実験結果

課題遂行時間を分析するために、被験者ごとに全 20 条件それぞれの繰り返し 3 試行分の課題遂行時間の中間値を求め、その値を被験者間で平均した。図 5-24 は各フィードバック条件での課題遂行時間を示す。グラフの x 軸はダイヤル長さ、y 軸は課題遂行時間、エラーバーは標準偏差を示す。

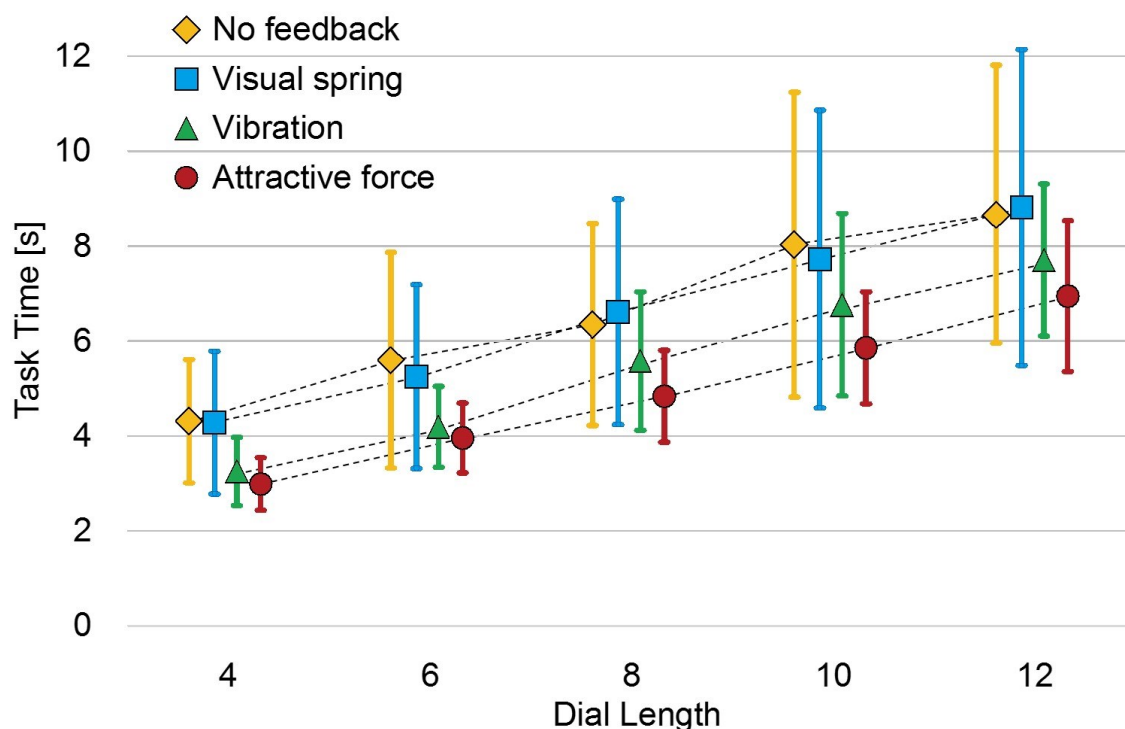


図 5-24 4つのフィードバック条件に対する平均課題遂行時間：  
x 軸はダイヤル長さ、y 軸は課題遂行時間、エラーバーは標準偏差を示す。

本実験結果に対し被験者内 2 要因分散分析（ダイヤル長さ要因 5 水準 {L4, L6, L8, L10, L12} × フィードバック要因 4 水準 {NF, VS, VB, AF}）を行った。その結果、ダイヤル長さ要因 ( $F(4, 92)=185.3, p<0.001$ ) およびフィードバック要因 ( $F(3, 69)=14.7, p<0.001$ ) において主効果が認められた。多重比較（Bonferroni 検定, 5%有意水準）の結果、NF-VS 間を除いて有意差が認められた ( $AF<VB<NF=VS$ )。本結果は H1 を部分的に支持する。

またダイヤル長さ要因とフィードバック要因間の相互効果において有意傾向が見られた ( $F(12, 276)=1.7, p=0.075$ )。各ダイヤル長さ条件においてフィードバック条件に対し多重比較を行った。L4 および L6 において、VB-AF 間および NF-VS 間を除いて有意差が認められた。つまり触覚フィードバックありとなしの間で有意差が認められた。一方で、L8 において NF-VB 間に、L10 において VS-VB 間に、L12 において NF-VB 間および VS-VB 間に有意差が認められなかった。この結果は、VB はダイヤル長さが短い時 (L4, L6) には課題遂行時間を減少させたが、ダイヤル長さが長くなるにつれてその効果が低減することを示唆する。この原因として、被験者は数スクロールした後にダイヤル終端が見つからなかった場合にスクロール速度を上げたため、注意がそちらに移り振動刺激を無視あるいは見逃してしまったためと考えられる。一方で H1 のとおり、同様の傾向は AF では見られなかった。本結果は H1 を支持する。

NF, VS, VB および AF の誤試行率はそれぞれ 3.1%, 0.3%, 1.3% および 0.8% であった。この結果に対してロジット分析を行った。分析には次のモデルを適用した。

$$Error \sim \alpha + \beta \times FDBK + r \quad (13)$$

ここで *Error* は誤試行率、*FDBK* はフィードバック条件 (NF, VS, VB, AF)、*r* はランダム効果 (被験者) である。NF をベースラインに設定した時、VS, VB および AF のオッズ比はそれぞれ 0.067 ( $p<0.01$ ), 0.411 ( $p=0.07$ ) および 0.202 ( $p<0.05$ ) であった。VB は有意水準に達しなかったが、本結果は部分的に H2 を支持する。

### 5.3.6.6 アンケート

Q1 および Q2 の回答結果を図 5-25 に示す。本結果に対し Wilcoxon signed-rank 検定を行ったところ、VB-AF 間で触覚を感じる頻度に関して有意差は見られなかった ( $p=0.492$ )。本結果は、被験者は時々振動刺激を見逃すという予想に反し、大半の被験者は振動刺激をほぼ常に感じていた。課題遂行時間の結果を考慮すると、被験者はダイヤルの終端で振動刺激を感じたにも関わらず余計にドラッグ入力したと考えられる。言い換えると、被験者はしばしば振動刺激を無視していたと考えられる。

Q3, Q4 および Q5 の回答結果を図 5-26 に示す。Steel-Dwass 検定より全 3 通りのスコアの対比較を行った。その結果、Q3-Q5 間のスコアで有意差が認められた ( $t=3.1, p<0.01$ )。一方で、Q3-Q4 間 ( $t=2.0, p=0.11$ ) および Q4-Q5 間 ( $t=2.3, p=0.06$ ) のスコアにおいてはいずれも有意差は認められなかった。本実験結果では有意水準には達しなかったものの、H3 で予想したとおり被験者は AF を好む傾向にあった。

自由記述では、AF に対して多くの肯定的なコメントがあり、H3 を支持するものであった。例えば、「吸引力は誰かが私の指をホールドしているように感じられ、指が動くのを防いでくれた。ターゲットを注視せずに操作するのに役立つであろう」とのコメント

トがあった。同様のコメントはVBにも見られた一方で、ある被験者は「振動に関しては確信がもてなかった」と回答した。別の被験者は「吸引力は物理的に指を止めてくれるので直感的であった。しかし、振動は間接的もしくは記号的であった」と報告した。一方で、次のようなAFに対する否定的なコメントもあった。「吸引力は面白かった。しかし新しすぎて慣れるまで時間がかかった。」「吸引力に恐怖感を覚えた。」

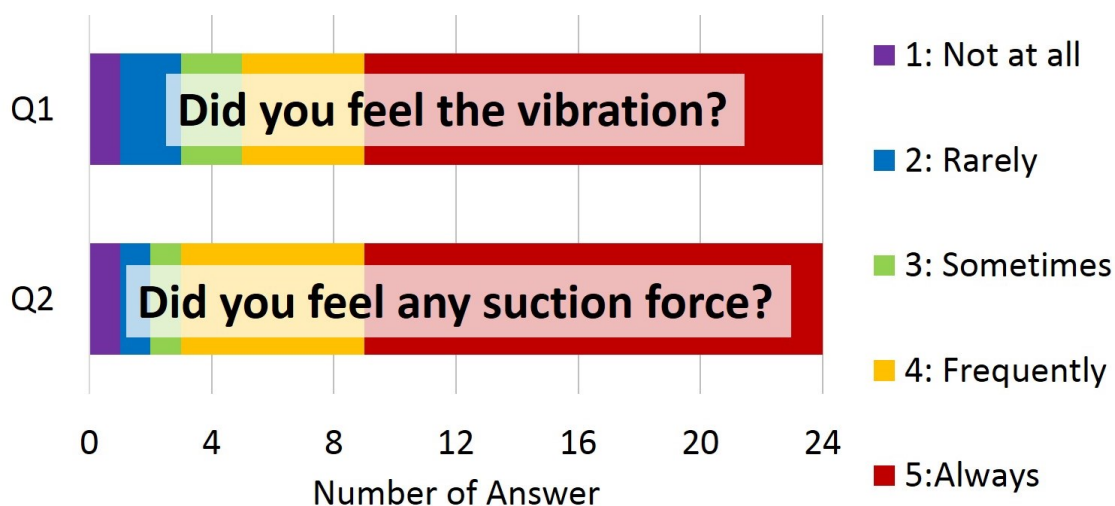


図 5-25 Q1 および Q2 の回答結果

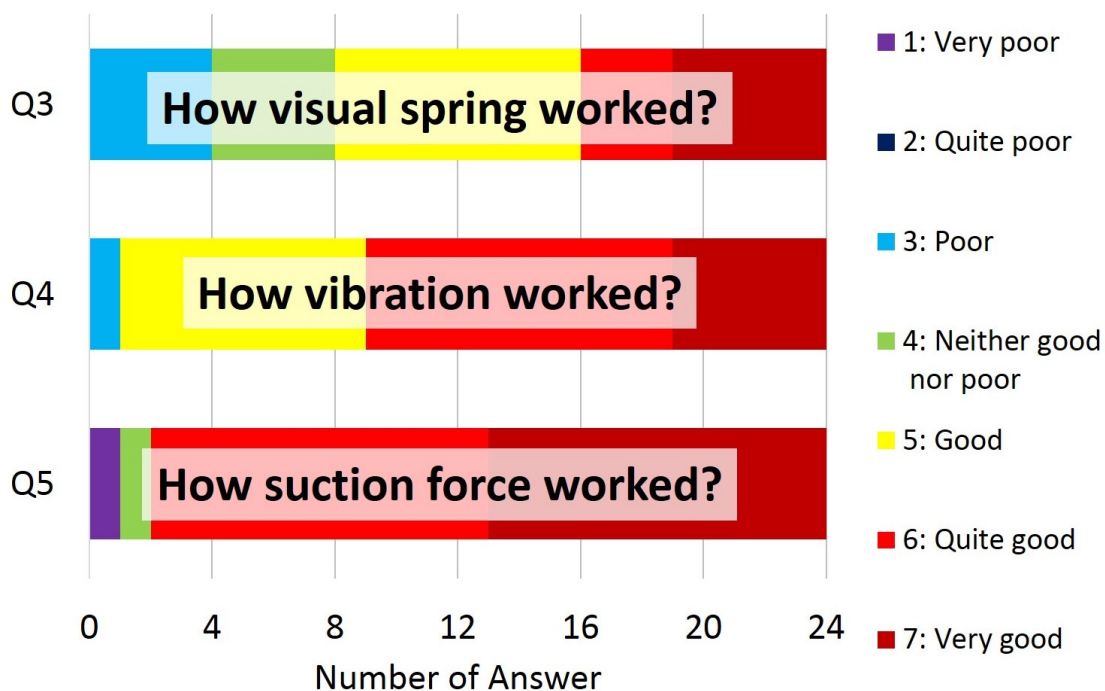


図 5-26 Q3, Q4 および Q5 の回答結果

## 5.3.7 考察

### 5.3.7.1 実験結果

VacuumTouch の利点の一つにユーザの運動に直接影響を与えられる点が挙げられる。本実験での課題はドラッグ入力を繰り返し行うものであった。言い換えると、被験者は指を能動的に動かしていた。この場合、ダイヤル終端で振動提示を行ったとしても運動を止めたり変化させたりすることは困難であった。一方で、引力提示は運動を強制的に止めることができた。これは VacuumTouch の提示引力がユーザの運動を変化ないし誘導するために十分であったことを示唆する。

課題遂行時間に関して、触覚フィードバックありの条件では触覚フィードバックなし条件と比較して短くなった。これは、前者ではダイヤル終端がターゲットに入った瞬間にフィードバックが提示された一方で、後者では被験者はダイヤル終端で少なくとも一度は終端を確認するためにドラッグ入力をしなければならなかったためと考えられる。

本実験結果はダイヤル GUI の操作性において、既存手法と比較した際の引力提示の効果を定量的に評価したものである。したがって、引力提示が最も優れた手法であることを支持するものでない。例えば、視覚フィードバックが触覚フィードバックと同様のタイミングで提示された（終端の数字の色や太さを変える等）場合、どちらが操作性に優れるかは不明である。しかし、引力提示条件が振動提示条件より優れていた、あるいは好まれる傾向にあったことを考慮すると引力提示は依然として優位であると予想できる。

### 5.3.7.2 制約および改善策

本システムでは、吸引口がユーザの指先で完全に覆われていない場合、引力を長時間提示し続けることは困難であった。この問題は、より排気速度の大きい真空ポンプや容量の大きいエアタンクを利用して、エアタンク内の真空圧を保持することで解決できると考えられる。

本システムでは、引力の発生におよそ 10ms の遅延が生じている。原因として次の 2 点が挙げられる。一点目は電磁弁内部のソレノイドの時間応答性である。ソレノイドの駆動力は電流に依存するため、大きなエネルギーをかければ応答性改善は可能であるが、消費電力の増大を招いてしまう。また、弁の移動距離の短い小型ソレノイドを使うのも効果的である。二点目はスクリーン上の空気が吸引口からエアタンクに引かれるまでにかかる時間である（現在の流路は約 30cm）。解決策として、流路を最適に設計することや、より強力な真空ポンプを利用することが挙げられる。

FingerFlux[180]とは異なり、本システムではスクリーン上方の空中にある指に引力を提示することは困難である（ユーザの指が吸引口に接触している必要がある）。スクリーン上方数ミリメートルでは、ユーザはわずかに触覚を感じることができるが、引力を感じているとはいい難く、むしろ皮膚感覚的であるといえる。より強力な真空ポンプを利用することでより離れたところに引力が提示可能になると考えられる。一方で、空中における引力の提示位置や範囲を制御することは困難であり、空間解像度は低くなると予想される。

本システムでは、引力提示のための吸引口が大きく、解像度も低い。したがって、吸引口が投影された映像を遮蔽したり、不必要な触刺激が吸引口のエッジ部分で生じたりする。簡便な解決策としてはメッシュスクリーンの利用が挙げられる。より理想的な解決策としてはマイクロバルブやマイクロチャネルのような Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) 技術を利用して、表示ピクセルレベルの微細な流路を構成することが考えられる。この手法を用いれば、タッチスクリーン[16]やディスプレイ[192]との一体化も可能である。

VacuumTouch は真空ポンプの代わりにエアコンプレッサを利用することで反力提示を行う、あるいは真空ポンプと組み合わせることで引力と反力の双方を提示することができる。こうした実装は様々な触覚提示を可能とし、新たなアプリケーション (5.3.5 項の Suction Button において、“Yes” / “No” ボタンに反力 (警告) と引力 (推奨) をそれぞれ提示する) が実現できると考えられる。

### 5.3.8 おわりに

本研究では、タッチスクリーンにおける引力提示装置 VacuumTouch を設計・開発した。本装置は真空ポンプ、エアタンクおよび電磁弁アレイによって構成され、タッチスクリーン上の空気を吸引することでユーザの指に引力提示する。ユーザは機器を装着する必要がないため、簡易に触覚インタラクションを体験できる。また、本装置のアプリケーションとして 3 つの GUI を実装し、被験者実験より引力提示によってダイアル GUI の操作性が向上することを定量的に示した。以上より、タッチスクリーン上での操作に対して効果的な引力提示を実現した。

本研究はタッチスクリーン上での新たな触覚インタラクションの実現を背景に、タッチスクリーン上での操作に対して引力提示する装置の実現を目的に行われた。本節では構築した引力提示可能なタッチスクリーンを用いて、引っかかりや誘導が可能な GUI を実現した。これはタッチスクリーンに引力提示を重畳したといえる。従来は GUI の視覚フィードバックに加え振動提示が重畳されていたが、物理的なスライダやダイアルがもつ引っかかりという本質的な機能を十分に再現できていなかった。一方で、引力提示によってこの本質的な機能が再現できた。また被験者実験から、引力提示によって物理的なダイアルと同様に扱えるようになったことにより操作性が向上したことを示した。

以上より、本研究は誇張表現のうち重畳モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発であったといえる。また、スライダ、ダイアル GUI において、物理的な引っかかりを再現することで実感性の伴ったタッチスクリーン操作が実現できたと結論づけられる。



## 5.4 第5章まとめ

本章では、トクトク感重畳、Jointonation および VacuumTouch の3つの研究を挙げて感覚 *A* に別の感覚 *B* を重畳する重畳モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発について述べた。本論文では、本モデルに対して現実には組み合わせられない感覚が組み合わせることで、比喩的に体験が分かりやすくなるという効果を主に期待した。トクトク感重畳に関する研究では、徳利で液体を注いだときに生じる振動を発生するペットボトルを実現した。液体の流出を強調し、注いだ量の錯誤効果を示したことで触覚的な飲食体験の演出の可能性を示した点で期待した効果が得られたと結論づけられる。Jointonation に関する研究では、従来の視聴覚的な変身に加えて実感性のある触覚的な変身が実現できた点で期待した効果が得られたと結論づけられる。VacuumTouch に関する研究では、引力提示によってタッチスクリーン上で物理的なスライダやダイヤルの引っかかりを再現し、操作性を向上できた点で期待した効果が得られたと結論づけられる。

3つの研究を通じて次に挙げる感覚提示の非類似性が今後の研究あるいは新たな重畳モデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発において重要であると考えられる。感覚提示の非類似性とは、元の感覚に対して誇張表現によって提示される感覚がどれほどかけ離れているかを示す尺度である。重畳モデルにおいては感覚 *B* が感覚 *A* に類似していないほど、非類似性が大きくなり、実感性のある体験になるとは限らないが、現実ではありえない新しい体験となりうる。

トクトク感重畳に関する研究では、ペットボトルから液体を注ぐ動作に対して、徳利から液体を注いだときの振動を重畳して液体の流出を強調した。一方で、重畳した感覚は、容器は違うが重畳される感覚と同様に液体を注ぐ動作に対して生じる振動感覚であった。液体を注いだ際とは異なる振動を重畳することで、非類似性が増し、より新しい体験、ひいては飲食体験の触覚的演出が創造できると考えられる。Jointonation に関する研究では、関節屈伸に対して物体を叩いた時やロボットを駆動した時の振動を重畳したように、非類似性の高い感覚を提示した。その結果、現実にはありえないが、実感性のある関節の材質感変調を実現できた。VacuumTouch に関する研究では、タッチスクリーン上での動作に対して引力を重畳したように、非類似性の高い感覚を提示した。その結果、スライダやダイヤル GUI において現実の物理スライダやダイヤルのような操作感を実現した。

感覚提示の非類似性は誇張表現全体においても、その誇張の度合いを評価する尺度の一つとして用いることができると考えられる。第1章で誇張表現を「実際の形状や性質を意図的に大きさに表現すること」と定義した。感覚提示が現実（元の感覚）と本質的に同じ場合、感覚提示の非類似性は低く誇張の度合いは小さい。これに対し、本論文で扱った誇張表現では、別の感覚で置き換える、感覚に操作を加える、別の感覚を重畳するといったように元の感覚とは異なり、感覚提示の非類似性が大きくなる。したがって、感覚提示の非類似性を評価することは誇張表現の度合いを評価することを意味する。

## 第6章

### 結論

本論文の目的は：1) 誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発；および  
2) 誇張表現に基づいた触覚インタラクションの実感性を向上するための要件を明らかにすること，であった。

本論文では、まず写実的な触覚インタラクションの設計・開発の限界について指摘し、漫画やアニメーションに見られる誇張表現について考察した。考察に基づき、誇張表現の3つの論理モデル：1) 代替モデル；2) 変調モデル；3) 重畳モデル，を定義した。次に、3つのモデルに基づいた8つの触覚インタラクションの設計・開発に関する研究について述べた。各研究では個々の背景を述べ、それに則した目的を設定し、具体的な実装および評価を行い、本論文の一つ目の目的を達成した。そして、各モデルにおける研究を総括し、誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発を評価する3つの尺度を見いだした。これらの尺度は他のモデルに基づいた触覚インタラクションの設計・開発の評価尺度として用いられると考えられる。以下に、3つの評価尺度についてまとめ、8つの研究を評価する。これにより、誇張表現を用いた触覚インタラクションの実感性を向上するための要件を明らかにする。

#### 6.1 誇張表現に基づいた触覚インタラクションの評価

##### 6.1.1 評価尺度

###### 6.1.1.1 信頼性

代替モデルでは、ユーザの運動に応じて常に安定して期待された感覚提示が行われていることを示す尺度である感覚提示の信頼性が重要な尺度として見いだされた。本論文では、2.1節でも述べたとおり、触覚インタラクションの対話性に着目した。現実世界において、例えば指で物体を叩く際、繰り返し同様の叩き方をすれば安定して同様の触覚刺激が返ってくる。バーチャルな触覚インタラクションにおいても、現実のように同様の動作に対して安定して期待される感覚が提示されることで実感性が向上すると考えられる。以上より、運動入力に対して信頼性のある感覚提示は体験の実感性向上において重要である。

###### 6.1.1.2 時間設計性

変調モデルでは、時間軸での感覚提示の設計が考慮されていることを示す尺度である感覚提示の時間設計性が重要な尺度として見いだされた。時間設計性には応答的なものと動的なものが考えられる。前者は主に感覚提示に対する遅延評価であり、後者は主に継続的な変化に対する評価である。感覚提示の時間設計性は誇張表現全体においても、その体験を評価する尺度、また誇張の度合いを評価する尺度の一つとして用いることができると考えられる。一般に、我々は恒常的なものよりも変化するものに注意が向けられる。そのため触覚インタラクションにおいて、ユーザの身体動作に対する応答の遅延

は対象の性状を把握するために重要な要素である。許容できないほどの大きい遅延は実感性を減退させ、わずかな遅延は感覚提示の何らかのアクセントになりうる。また、ユーザが身体を動かしていない定常状態においても、触れているものの動的な変化は対象の性状を把握するために重要な要素である。変化の速度を遅くしたり、速くしたりする等で表現の幅を広げられる。以上より、感覚提示の時間設計性は体験の誇張表現の実感性向上において重要であり、また誇張の度合いを示す尺度となりうる。

### 6.1.1.3 非類似性

重畳モデルでは、元の感覚に対して誇張表現によって提示される感覚がどれほどかけ離れているか示す尺度である非類似性が重要な尺度として見いだされた。第1章で誇張表現を「実際の形状や性質を意図的に大げさに表現すること」と定義した。感覚提示が現実(元の感覚)と本質的に同じ場合、感覚提示の非類似性は低く誇張の度合いは小さい。これに対し、本論文で扱った誇張表現では、別の感覚で置き換える、感覚に操作を加える、別の感覚を重畳するといったように元の感覚とは異なり、感覚提示の非類似性が大きくなる。したがって、感覚提示の非類似性を評価することは誇張表現の度合いを評価することを意味する。

## 6.1.2 評価

表 6-1 に各研究の各尺度に対する4段階：1) 低い；2) 低くも高くもない；3) 高い；もしくは0) 評価できない、での大まかな評価を示す。本評価は本論文の執筆時点での評価である。

表 6-1 誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発に関する研究の評価

モデル		信頼性	時間設計性		非類似性
			応答的	動的	
代替	カチカチ感	2	3	1	3
	Visual Vibration	2	1	0	2
変調	HaCHIStick & HACHISStack	3	3	0	2
	拡張歯ブラシ	3	1	3	2
	トクトク感再現	3	1	3	1
重畳	トクトク感重畳	3	1	1	2
	Jointonation	2	1	2	3
	VacuumTouch	3	2	1	3

#### 6.1.2.1 カチカチ感に関する研究

被験者実験より、カチカチ感提示による腕立て伏せの屈伸量が大きくなる傾向や同様の姿勢を取りやすくなる傾向が観察できた。一方で、現在のカチカチ感提示装置は、カチカチ感提示の周期が大きいことや肘の可動閾が小さいこと、装着時の装置のずれ等、触覚提示の階調性や安定性に制約があった。以上より、信頼性は低くも高くもないと評価した。カチカチ感提示装置は完全に受動的な機構であるので感覚提示の遅延がない。

さらに、屈伸角度を提示するという目的において、あえて遅延を加えることによる利点はない。以上から、応答的な時間設計性は高いといえる。一方で、動的な時間設計性に関して、現在の機構では困難であるが、状況に応じてカチカチ感提示の周期を変える等の設計が考えられる。以上から、動的な時間設計性は議論の余地があるといえ、低いと評価した。また、ロータリスイッチを回転させた際の離散的な触覚は通常肘を屈伸させた際には生じないことから非類似性が高いといえる。

#### 6.1.2.2 Visual Vibration に関する研究

被験者実験より、Visual Vibrationによって材質感を提示できることを示した。一方で、一部のユーザから期待した振動とは異なるように感じられるとの報告があった。以上から信頼性は低くも高くもないと評価した。応答的な時間設計性に関しては、計測一提示間で生じる遅延に関する評価を行っていないため結論づけることはできないが、先行研究[74][112][113]を考慮すると、改善の予知があるため低いと評価した。一方で、物体を叩いた時の振動は瞬間的な刺激であり、用いた振動モデルの制約上動的な時間設計は困難である。非類似性に関しては、振動の周波数や振幅を大幅に変調した一方で、振動は現実の振動に基づいているため低くもなく高くもないという評価をした。

#### 6.1.2.3 HaCHIStick & HACHISstack に関する研究

振動提示には先行研究で有効性が既に示されている振動モデル[134]を用いたため、被験者実験でも示したとおり、信頼性の高い感覚提示であったといえる。システムが十分な応答性をもっていることを被験者実験より示した。また、わずかな遅延を加えることで材質感提示の幅を拡張できることも示した。以上より、応答的な時間設計性は高いと評価できる。一方で、物体を叩いた時の振動は瞬間的な刺激であり、用いた振動モデルの制約上動的な時間設計は困難である。振動提示に用いた振動モデルは Okamura らが実際に物体を叩いた時に生じる振動に変調を加えたものであり、現実に生じるものと異なるものの非類似性が高いとはいえない。したがって、叩き動作に対する振動提示により非類似性の高い振動モデルを用いることで、現実にはありえないが、実感性の高い体験が実現できると考えられる。

#### 6.1.2.4 拡張歯ブラシに関する研究

被験者実験より、歯磨き時の生じる音の変調音によって口腔内の印象が変化したことから信頼性の高い感覚提示であったといえる。応答的な時間設計性に関しては、歯磨きの動作と変調音にずれを感じると報告したユーザがいたことからシステムは十分な応答性をもっていたとはいえず、低いと評価できる。一方で、動的な時間設計性に関しては、動的に変調周波数を変化することで通常よりも歯を磨けたように感じるという達成感の増強を可能にした点で高いといえる。非類似性に関して、実際に生じる歯磨き音を音源に使用した一方で、変調を加えて提示していたので実際に生じる音とは異なるため、低くも高くもないと評価した。音源により非類似性の高いものを用いることで、新たな歯磨き体験が実現できると考えられる。

#### 6.1.2.5 トクトク感再現に関する研究

被験者実験より、構築した振動モデルは液体の流出感を再現できていたといえ、信頼性の高い感覚提示であったといえる。被験者実験において、システムの遅延について言

及する被験者はいなかった。これは徳利内部の液量が明示的に示されなかったため、液体が流れ出す徳利角度が不明瞭であったためと考えられる。特に残量感の再現に関して、どれほどの角度で液体が流れ出し振動が生じるかは重要であるので、応答的な時間設計性に関しては検討が必要であり、低いと評価した。一方で、動的に最大振幅を変調することで残量感を再現することができたことから、動的な時間設計性に関しては高いと評価した。非類似性に関して、水の流出および残量感の再現においては実際の振動に基づいた振動モデルを構築したため低いといえる。一方で粘性感に関しては、実際の振動に基づいてはいるが、大幅な変調を加えているため現実に生じるものと異なることから低くも高くもないといえる。したがって、研究全体としては現象の再現を試みたということもあり、非類似性は低いと評価した。

#### 6.1.2.6 トクトク感重畳に関する研究

振動提示には前研究で構築した振動モデルを用い、さらに被験者実験でも示したとおり、液体の流出を強調できたという点で信頼性の高い感覚提示であったといえる。飲食体験の触覚的演出を考えた際、本来は液体の流出に合わせて振動を提示すべきであるが、トクトク感重畳装置はペットボトルの傾きに応じて振動を提示したため、液体の流出と振動提示にはずれがあった。以上から、応答的な時間設計性は低いと評価した。また、本実験では残量を考慮しないモデルを使用したため、動的な時間設計性についても検討の余地があるため、動的な時間設計性は低いと評価した。非類似性に関しては、容器は違いますが重畳される感覚と同様に液体を注ぐ際に生じる振動感覚であったため、低くも高くもないと評価した。液体を注いだ際とは異なる振動を重畳することで新たな体験、ひいては飲食体験の触覚的演出が創造できると考えられる。

#### 6.1.2.7 Jointonation に関する研究

被験者実験より、振動提示によって触覚的な変身が実現できることを示した。一方で、ロボットへの変身において、ユーザが振動モデルを構築した際のロボットと異なる種類のロボットを想起した場合、振動提示がユーザの期待と異なり変身の実感性が低下することから感覚提示の信頼性は低くもなく高くもないと評価した。システムの制約上、ユーザの身体運動計測で遅延が生じ、ユーザも振動提示に遅延があると報告したため、応答的な時間設計性は低いと評価した。一方で没入型ロボット変身体験 VR ゲームにおいては、ユーザの屈伸運動が止まる瞬間にパルス的な振動を提示した。これにより、「ガシャン」というロボット感を表現した。しかし、この表現による効果は未検証であるため、動的な時間設計性は低くも高くもないと評価した。身体の屈伸動作に対して物体を叩いた時に生じる振動やロボット駆動時に生じる振動の提示は非類似性が高いといえ、現実にはありえない体験を実現した。

#### 6.1.2.8 VacuumTouch に関する研究

被験者実験より、引力提示によって GUI の操作性が向上したことより、信頼性が高い感覚提示が行えていたといえる。被験者実験用に再構築したシステムでは遅延を訴えるユーザはいなかった。一方で、引力提示にわずかに遅延を加える等の設計はシステム的设计上困難であった。以上から応答的な実感設計に関しては議論の余地があり、低くも高くもないと評価した。また、引力提示の動的な時間設計性についても検討の余地があることから、低いと評価した。タッチスクリーン上での操作に対する引力提示は非類似

性が高いといえ、実際の物理スライダやダイヤルのような体験をタッチスクリーン上で実現することを可能にした。

以上より、3つの尺度によって本論文で述べた誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発に関する研究を評価する事ができた。また、本評価によって誇張表現に基づいた触覚インタラクションの実感性向上のための要件が明らかとなった。

## 6.2 今後の展望

本論文では、誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発について述べた。触覚インタラクションの設計・開発に誇張表現を適用することで、現実の体験とは異なるものの実感性に優れる体験を実現した。また、3つの尺度を見だし、誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発の評価し、実感性向上のための要件を明らかにした。以上より、本論文の目的を達成した。本節では、本研究の今後の展望を述べ本論文の結びとする。

### 6.2.1 他の感覚との相互作用の検証

本研究の一部では、触覚以外の感覚を同時に提示することにより体験の質の向上を試みたが、主に触覚インタラクションのみでの評価を行った。実用的なコンテンツの創造や評価を考えた際、他の感覚と組み合わせるマルチモーダルな状況も想定すべきである。

誇張表現を用いたマルチモーダルインタラクションの設計・開発において、他の感覚との帯域の違いを考慮しなければならない。例えば、3.2節でも述べたとおり、視覚、聴覚、触覚ではそれぞれ振動知覚に関する周波数帯域が異なる。そのため、現実では感覚  $A$  では知覚できる振動刺激でも他の感覚  $B$  では知覚できないという状況がありうる。本研究では、振動周波数を変調して提示することで感覚  $B$  でも振動を知覚できるようにするという事を行った。しかし、この際、感覚  $A$  と  $B$  には異なる振動周波数が提示されることになる。この時に考えられる主観的な体験として、振動が同一の現象であると感じられない場合と振動が同一の現象であると感じられる場合がある。臨場感の向上という目的においては後者が望ましいが、後者の場合に主観的に感じられる振動周波数や同一の現象と感じられる振動周波数差の閾値等を検証する必要があるといえる。

### 6.2.2 写実的な触覚インタラクションの設計・開発との関係性

第1章にて、写実的な触覚インタラクションの限界とともに、現在の触覚インタラクションは視聴覚コンテンツと比較して質が低いことを指摘した。一方で、将来的には現在の視聴覚コンテンツと同程度に写実的な触覚インタラクションが実現することが期待できる。触覚の生理学的・心理学的な研究が進むことで、触覚の知覚メカニズムが現在よりも明らかになり触覚インタフェースの設計要件が明確になる。同様に、工学的な進歩により、より高品位なアクチュエータやセンサが開発され、より高品位な触覚インタフェースの設計・開発も可能となる。さらに、触覚シミュレーション技術が向上すれば、写実的な触覚インタラクションが実現されると考えられる。

このような状況下でも、誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発に関する研究には意義があると考えられる。その理由として、第一に、漫画やアニメーション

ンのように視聴覚においては誇張表現が用いられたコンテンツが写実的な視聴覚コンテンツが存在する今日でも需要があることが挙げられる。第二に、第1章でも述べたとおり、現実に感覚統合において触覚が劣位に扱われることが挙げられる。手術訓練等、現実の再現性が重要となるような応用先では再現性に劣る誇張表現に基づいた触覚インタラクションは必ずしもふさわしいとはいえない。しかし、臨場感が求められるビデオゲーム等のエンタテインメント分野では触覚インタラクションの設計・開発に対して積極的な誇張表現の適用が期待できる。

誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発は写実的なそれと互助関係にあると考えられる。誇張表現は現実に基づいて行われることで実感性が向上することから、我々が触覚によってどのように現実を認識しているかといった知見が重要になる。したがって、本研究の基礎は写実的な触覚インタラクションの設計・開発にあるといえる。一方で、本研究は触覚インタラクションの本質と考えられる事象を強調し、実感性の向上を検証するといった過程をとる。これは言い換えると、触覚インタラクションにおける本質を探索しているといえ、触覚による現実の認識を理解する上で重要な知見となる。

### 6.2.3 誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発の蓄積

本研究を触覚研究、ひいてはVRやHCI研究分野で確立していくために、誇張表現に基づいた触覚インタラクションの設計・開発の蓄積が必要である。そのために、前節で明らかとなった要件を基に、個々の研究を見直し、改善を試みることで本論の妥当性を強調していきたい。特に時間設計性は、本論文で述べた研究は評価の低いものが多いことから今後注力されるべき要素であるといえる。

また、同時に新たに誇張表現に基づいた触覚インタラクションを設計・開発することで事例を増やすことも重要である。これを遂行するには、より多くの設計者、開発者、あるいはクリエイターが触覚インタラクションの設計・開発を行える環境が必要である。現在、触覚インタラクションの設計・開発の世間の認知度は視聴覚コンテンツの設計・開発と比較して高いとはいえない。設計・開発の敷居を下げるためにも、TECHTILE toolkit[124]のような触感開発ツールや触覚インタラクションの設計・開発に関するワークショップの開催が必要であるといえる。

# 謝辞

本論文は、著者が電気通信大学 大学院情報理工学研究科 総合情報学専攻 博士前期課程および博士後期課程在学中に行った研究をまとめたものです。

指導教員の梶本裕之准教授には、学部時代より研究を指導していただき心より感謝致します。研究以外の面でも広くお世話になり、一社会人としても尊敬できる先生の下で研究生生活を送れたことを誇り高く思います。

兼子正勝教授、板倉直明教授、坂本真樹准教授、電気通信大学 大学院情報システム研究科 メディアシステム学専攻 野嶋琢也准教授には、本論文のご精読および審査を通じて多くの重要なコメントを頂きました。深謝致します。

The study on Visual Vibration (Section 3.2) was conducted at Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA) Rennes, France. I would like to thank Dr. Anatole Lécuyer, Dr. Maud Marchal, Dr. Gabriel Cirio and INRIA Rennes Bunraku team members.

The study on VacuumTouch (Section 5.3) was conducted at Microsoft Research (MSR), Beijing, China. I would like to thank Dr. Masaaki Fukumoto, Dr. Koji Yatani, Zhaoyuan Ma and MSR researchers and interns.

3.1 節のカチカチ感に関する研究および 5.2 節の Jointonation に関する研究は栗原洋輔君（現ソニー・コンピュータエンタテインメント）と、4.3 節のトクトク感再現に関する研究および 5.1 節のトクトク感重畳に関する研究は池野早紀子さんと共同で行った研究です。Jointonation の設計・開発に関しては、小川大地君、高下昌裕君、武井聖也君、中井優理子さんに協力していただきました。また、秘書の生田淳子さん、橋本悠希助教（現筑波大学）、古川正紘助教（現大阪大学）、福嶋政期博士（現東京大学）を初めとした多くの先輩、國安裕生君（現オムロン）や中田明日香さん（現 lunaworks）を初めとした同期、趙姝杨さん（現東芝）や吉川博美さん（現リコー）を初めとした多くの後輩、と私は優秀な研究室メンバーに恵まれ、楽しい研究生生活を送らせていただきました。感謝致します。

本研究では多くの被験者実験を行いました。貴重な時間を割いて実験に参加、協力していただいた皆様に感謝致します。

最後に、今一度本研究に貢献して下さった皆様、いつも私を暖かく見守っていただいた家族、友人へ心から感謝の気持ちとお礼を申し上げたく、謝辞にかえさせていただきます。



## 関連発表

査読付きジャーナル論文: (3 件)

- i. **Hachisu, T.** and Kajimoto, H.: Modulating Tooth Brushing Sounds to Affect User Impressions, *International Journal of Arts and Technology*, 2014. [accepted]
- ii. 蜂須, 梶本 : HACHISStack: 2 層の光センサを用いた高速タッチパネルの開発, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 19, no. 4, pp. 503-512, 2014.
- iii. Kurihara, Y., Takei, S., Nakai, Y., **Hachisu, T.**, Kuchenbecker, K. J. and Kajimoto, H.: Haptic Robotization of the Human Body by Data-Driven Vibrotactile Feedback, *Entertainment Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 485-494, 2014.

査読付き国際会議論文 : (14 件)

- iv. **Hachisu, T.**, Cirio, G., Marchal, M., Lécuyer, A. and Kajimoto, H.: Pseudo-Haptic Feedback Augmented with Visual and Tactile Vibrations, *ISVRI 2011*, pp.327-328, 2011.
- v. **Hachisu, T.**, Sato, M., Fukushima, S., Kajimoto, H.: HaCHIStick: Simulating Haptic Sensation on Tablet PC for Musical Instruments Application, *UIST 2011*, pp.73-74, 2011.
- vi. **Hachisu, T.**, Cirio, G., Marchal, M., Lécuyer, A. and Kajimoto, H.: Virtual Chromatic Percussions Simulated by Pseudo-Haptic and Vibrotactile Feedback, *ACE 2011*, 2011.
- vii. Kurihara, Y., Kuniyasu, Y., **Hachisu, T.**, Sato, M., Fukushima, S. and Kajimoto, H.: Augmentation of Kinesthetic Sensation by Adding "Rotary Switch Feeling" Feedback, *AH 2012*, 2012.
- viii. **Hachisu, T.**, Sato, M., Fukushima, S. and Kajimoto, H.: Augmentation of Material Property by Modulating Vibration Resulting from Tapping, *EuroHaptics 2012*, pp.173-180, 2012.
- ix. **Hachisu, T.** and Kajimoto, H.: Augmentation of Toothbrush by Modulating Sounds Resulting from Brushing, *ACE 2012*, pp.31-43, 2012.
- x. Kurihara, Y., **Hachisu, T.**, Sato, M., Fukushima, S. and Kajimoto, H.: Virtual Alteration of Body Material by Periodic Vibrotactile Feedback, *IEEE VR 2013*, pp. 31-34, 2013.
- xi. **Hachisu, T.** and Kajimoto, H.: HACHISStack: Dual-Layer Photo Touch Sensing for Haptic and Auditory Tapping Interaction, *CHI 2013*, pp. 1411-1420, 2013.
- xii. Kurihara, Y., **Hachisu, T.**, Kuchenbecker, K. J. and Kajimoto, H.: Virtual Robotization of the Human Body via Data-Driven Vibrotactile Feedback, *ACE 2013*, pp. 109-122, 2013.
- xiii. Ikeno, S., Okazaki, R., **Hachisu, T.**, Sato, M. and Kajimoto, H.: Audio-Haptic Rendering of Water Being Poured from Sake Bottle, *ACE 2013*, pp. 548-551, 2013.

- xiv. Kurihara, Y., **Hachisu, T.**, Kuchenbecker, K. J. and Kajimoto, H.: Jointonation: Robotization of the Human Body by Vibrotactile Feedback, SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies, 2013.
- xv. **Hachisu, T.**, Masaaki Fukumoto: VacuumTouch: Attractive Force Feedback Interface for Haptic Interactive Surface using Air Suction, CHI 2014, pp. 411-420, 2014.
- xvi. **Hachisu, T.**, Cirio, G., Marchal, M., Lécuyer, A. and Kajimoto, H.: Visual Vibrations to Simulate Taps on Different Materials, Asia Haptics 2014, 2014.
- xvii. Ikeno, S., Okazaki, R., **Hachisu, T.**, Sato, M. and Kajimoto, H.: Creating an Impression of Virtual Liquid by Modeling Japanese Sake Bottle Vibrations, IEEE 3DUI 2015, 2015. [accepted]

国内会議: (6件, 筆頭著者のもののみ記載)

- xviii. **蜂須**, 梶本: 運動後に感覚呈示を行う触力覚運動教示システム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010.
- xix. **蜂須**, Cirio, G., 古川, Marchal, M., Lécuyer, A., 梶本: 触振動刺激付加による Pseudo-Haptic Feedback の拡張: 平面上の凹凸感呈示, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 2011.
- xx. **蜂須**, シリオ, マーシャル, レキュイエール, 梶本: 鍵盤楽器打鍵時に生じる触覚的材質感の再現, 情報処理学会エンタテインメントコンピューティング 2011, 2011.
- xxi. **蜂須**, 梶本: 歯磨き音の変調による歯磨き感拡張, 情報処理学会エンタテインメントコンピューティング 2012, pp. 265-272, 2012.
- xxii. **蜂須**, 池野, 栗原, 梶本: 自己運動に基づいた減衰正弦振動呈示による体性感覚拡張, 第1回レイグジスタンス研究会, pp. 13-16, 2012.
- xxiii. **蜂須**, 梶本: 叩き動作に対する振動呈示の遅延が材質感呈示に及ぼす影響の調査, 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 78-81, 2014.

## 参考文献

- [1] Akamatsu, M. and Sato, S.: A Multi-Modal Mouse with Tactile and Force Feedback, *International Journal of Human-Computer Studies* 40, pp. 443-453, 1994.
- [2] Annett, M., Grossman, T., Wigdor, D. and Fitzmaurice, G.: Medusa: A Proximity-Aware Multi-Touch Tabletop. *UIST 2011*, pp. 337-346, 2011.
- [3] Amemiya, K. and Tanaka, Y.: Portable Tactile Feedback Interface using Air Jet. *ICAT 1999*, pp. 115-122, 1999.
- [4] Arm and Hammer Spinbrush: TooSth Tunes, <http://www.toothtunes.com/>, (Accessed 23 September 2014).
- [5] Badesc, M., Wampler, C. and Mavroidis, C.: Rotary Haptic Knob for Vehicular Instrument Controls, *HAPTICS 2002*, pp.342-343, 2002.
- [6] Ban, Y., Kajinami T., Narumi, T., Tanikawa, T., and Hirose, M.: Modifying an Identified Curved Surface Shape using Pseudo-Haptic Effect, *IEEE Haptics Symposium*, pp. 211-216, 2012.
- [7] Bass, C.C.: An Effective Method of Personal Oral Hygiene; Part II, *Journal of the Louisiana State Medical Society* 106 (3), pp. 100-112, 1954.
- [8] Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A. and Harrison, C.: Teslatouch: Electro-vibration for Touch Surfaces. *UIST 2010*, pp.283-292, 2010.
- [9] Bayart, B. and Kheddar, A.: Haptic Augmented Reality Taxonomy: Haptic Enhancing and Enhanced Haptics, *EuroHaptics 2006*, pp. 641-644, 2006
- [10] Bendazzi, G.: “Cartoons: One Hundred Years of Cinema Animation”, *Indiana University Press*, 1994.
- [11] Benko, H.: Beyond Flat Surface Computing: Challenges of Depth-Aware and Curved Interfaces. *MM 2009*, pp. 935-944, 2009.
- [12] Benko, H., Ishak, E. W. and Feiner, S.: Cross-Dimensional Gestural Interaction Techniques for Hybrid Immersive Environments. *IEEE Conference on Virtual Reality 2005*, pp. 209-216, 2005.
- [13] Benko, H., Jota, R. and Wilson, A. D.: MirageTable: Freehand Interaction on a Projected Augmented Reality Tabletop. *CHI 2012*, pp. 199-208, 2012.
- [14] Benko, H. and Wilson, A.: DepthTouch: Using Depth-Sensing Camera to Enable Freehand Interactions on and above the Interactive Surface. *Microsoft Research Technical Report MSR-TR-2009-23*, Microsoft, 2009.
- [15] Biocca, F., Kim, J., and Choi, Y.: Visual Touch in Virtual Environments: An Exploratory Study of Presence, Multimodal Interfaces, and Cross Modal Sensory Illusion, *Presence* 10 (3), pp. 247-265, 2001.

- [16] Bitá, I., Govil, A. and Gusev, E.: Mirasol(R) – MEMS-Based Direct View Reflective Display Technology. Handbook of Visual Display Technology, pp. 1777-1786, 2012.
- [17] Brown, R. L.: Wrapper Influence on Perception of Freshness in Bread, Journal of Applied Psychology 42 (4), pp. 257-260, 1958.
- [18] Burke, D., Hagbarth, K. E., Löfstedt, L. and Wallin, G.: The Responses of Human Muscle Spindle Endings to Vibration of Non-Contracting Muscles. Journal of Physiology 261 (3), pp. 673-693, 1976.
- [19] Butler, A., Izadi, S. and Hodges, S.: SideSight: Multi-“Touch” Interaction around Small Devices. UIST 2008, pp. 201-204, 2008.
- [20] Cardin, S., Vexo, F. and Thalmann, D.: Head Mounted Wind. CASA2007, pp. 101-108, 2007.
- [21] Carter, T., Seah, S. A., Long, B., Drinkwater, B. and Subramanian, S.: UltraHaptics: Multi-Point Mid-Air Haptic Feedback for Touch Surfaces. UIST 2013, pp. 505-514, 2013.
- [22] Casiez, G., Roussel, N., Vanbelleghem, R. and Giraud, F.: Surfpad: Riding towards Targets on a Squeeze Film Effect, CHI 2011, pp. 2491-2500, 2011
- [23] Chang, Y. C., Lo, J. L., Huang, C. J., Hsu, N. Y., Chu, H. H., Wang, H. Y., Chi, P. Y. and Hsieh, Y. L.: Playful Toothbrush: Ubicomp Technology for Teaching Tooth Brushing to Kindergarten Children, CHI 2008, pp. 363-372, 2008
- [24] Cirio, G., Marchal, M., Hillaire, S. and Lécuyer, A.: Six Degree-of-Freedom Haptic Interaction with Fluids, Transactions on Visualization and Computer Graphics 18 (4), pp. 546-554, 2012.
- [25] Cirio, G., Marchal, Lécuyer, A. and Cooperstock, J. R.: Vibrotactile Rendering of Splashing Fluids, Transactions on Haptics 6 (1), pp. 117-122, 2013.
- [26] Cutler, L. D., Fröhlich, B. and Hanrahan, P.: Two-Handed Direct Manipulation on the Responsive Workbench. I3D 1997, pp. 107-114, 1997.
- [27] Delavier, F. : “目でみる筋力トレーニングの解剖学”, 大修館書店, 2002.
- [28] Deligiannidis, L. and Jacob, R. J. K.: The VR Scooter: Wind and Tactile Feedback Improve User Performance. IEEE 3DUI 2006, pp. 143-150, 2006.
- [29] Dionisio, J.: Virtual Hell: A Trip through the Flames. Computer Graphics and Applications 17 (3), pp. 11-14, 1997.
- [30] Dominjon, L., Lécuyer, A., Burkhardt, J. M., Richard, P. and Richir, S.: Influence of Control/Display Ratio on Perception of Mass of Manipulated Objects in Virtual Environments, VR 2005, pp. 19-25, 2005
- [31] Ehtler, F., Pototsching, T. and Klinker, G.: An LED-Based Multitouch Sensor for LCD Screens, TEI 2010, pp. 227-230, 2010.

- [32] Ernst, M. O. and Bühlhoff, H. H.: Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences* 8 (4), pp. 162-169, 2004.
- [33] Ernst, M. O. and Banks, M. S.: Humans Integrate Visual and Haptic Information in a Statistically Optimal Fashion, *Nature* 415, pp. 429-433, 2002.
- [34] Feygin, D., Keehner, M. and Tendick, F.: Haptic Guidance: Experimental Evaluation of a Haptic Training Method for a Perceptual Motor Skill, *HAPTICS 2002*, pp.40-47, 2002.
- [35] Fiene, J.P. and Kuchenbecker, K.J.: Shaping Event-Based Haptic Transients via an Improved Understanding of Real Contact Dynamics, *IEEE World Haptics Conference 2007*, pp. 170-175, 2007.
- [36] Frati, V. and Prattichizzo, D.: Using Kinect for Hand Tracking and Rendering in Wearable Haptics, *WHC 2011*, pp. 317-321, 2011.
- [37] Fukuda, T.: Relation between Flicker Fusion Threshold and Retinal Positions, *Perceptual and Motor Skills* 49 (1), pp. 3-17, 1979.
- [38] Fukumoto, M. and Sugimura, T.: Active Click: Tactile Feedback for Touch Panels, *CHI 2001*, pp. 121-122, 2001.
- [39] Furuya, T., Yanagisawa, Y., Tamesue, T. and Itoh, K.: Transmission of Acoustic Information of Percussion Instruments through Tactile Sensation using Air-Jet Stimulation for Hearing Impaired Person, *UAHCI 2009*, pp. 48-57, 2009.
- [40] Follmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Cheng, N. and Ishii, H.: Jamming User Interfaces: Programmable Particle Stiffness and Sensing for Malleable and Shape-Changing Devices, *UIST 2012*, pp. 519-528, 2012.
- [41] Gibson, J. J.: Observations on Active Touch, *Psychological Review* 69, pp. 477-490, 1962.
- [42] Gibson, J. J.: "The Senses Considered as Perceptual Systems", Houghton Mifflin, 1966.
- [43] Gleeson, B. and Johnson, D. E.: Expressive Haptic Rendering with Cartoon-Inspired Effects, *Haptics Symposium 2010*, pp. 191-194, 2010.
- [44] Goodwin, G. M., McCloskey, D. I., and Matthews, P. B. C.: The Contribution of Muscle Afferents to Kinesthesia Shown by Vibration Induced Illusions of Movement and by the Effects of Paralyzing Joint Afferents, *Brain* 95 (4), pp. 705-748, 1972.
- [45] Grindlay, G.: Haptic Guidance Benefits Musical Motor Learning, *HAPTICS 2008*, pp. 309-404, 2008.
- [46] Grossman, T., Hinckley, K., Baudisch, P., Agrawala, M. and Balakrishnan, T.: Hover Widgets: Using the Tracking State to Extend the Capabilities of Pen-Operated Devices, *CHI 2006*, pp. 861-870, 2006.
- [47] Guest, S., Catmur, C., Lloyd, D. and Spence, C.: Audiotactile Interactions in Roughness Perception, *Experimental Brain Research* 146 (2), pp. 161- 171, 2002.

- [48] Gupta, S., Morris, D., Patel, N. S. and Tan, D.: AirWave: Non-Contact Haptic Feedback using Air Vortex Rings, UbiComp 2013, pp. 1-10, 2013.
- [49] Han, J. Y.: Low-Cost Multi-Touch Sensing through Frustrated Total Internal Reflection, UIST 2005, pp. 115-118, 2005.
- [50] Harrison, C. Benko, H. and Wilson, A. D.: OmniTouch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere, UIST 2011, pp. 441-450, 2011.
- [51] Harrison, C. and Hudson, S. E.: Abracadabra: Wireless, High-Precision, and Unpowered Finger Input for Very Small Mobile Devices, UIST 2009, pp. 121-124, 2009.
- [52] Hashimoto, Y. and Kajimoto, H.: Slow Motion Replay of Tactile Sensation, ICAT 2010, pp. 51-56, 2010.
- [53] Hashimoto, Y., Inami, M., and Kajimoto, H.: Straw-Like User Interface (II): a New Method of Presenting Auditory Sensations for a more Natural Experience, Haptics 2008, pp. 484-493, 2008.
- [54] Hashimoto, Y., Nakata, Y. and Kajimoto, H.: Novel Tactile Display for Emotional Tactile Experience, ACE 2009, pp. 124-131, 2009.
- [55] Henmi, K. and Yoshikawa, T.: Virtual Lesson and its Application to Virtual Calligraphy system, ICRA 1998 2, pp. 1275-1280, 1998.
- [56] Higuchi, K. and Rekimoto, J.: Flying Head: A Head Motion Synchronization Mechanism for Unmanned Aerial Vehicle Control, CHI 2013, pp. 2029-2038, 2013.
- [57] Hikichi, K., Morino, H., Fukuda, I., Matsumoto, S. Yasuda, Y. Arimoto, I., Iijima, M. and Sezaki, K.: Architecture of Haptics Communication System for Adaptation to Network Environments, ICME 2001, pp. 563-566, 2001.
- [58] Hirano, Y., Kimura, A., Shibata, F. and Tamura, H.: Psychophysical Influence of Mixed-Reality Visual Simulation on Sense of Hardness, VR2011, pp. 51-54, 2011.
- [59] 広瀬：快音発生酒トックリ，特開平 9-28541.
- [60] Hirsch, M., Lanman, D., Holtzman, H. and Raskar, R.: BiDi Screen: A Thin, Depth-Sensing LCD for 3D Interaction using Light Fields, SIGGRAPH Asia 2009, pp. 1-9, 2009.
- [61] Heilig, M.: Sensorama simulator. US Patent 3050870, 1962.
- [62] Hilliges, O., Izadi, S., Wilson, A. D., Hodges, S., Garcia-Mendoza, A. and Butz, A.: Interactions in the Air: Adding Further Depth to Interactive Tabletops, UIST 2009, pp. 139-148, 2009.
- [63] Hodges, S., Izadi, S., Butler, A., Rrustemi, A. and Buxton, B.: ThinSight: Versatile Multi-Touch Sensing for Thin Form-Factor Display, UIST 2007, pp. 259-268, 2007.
- [64] Hofer, R., Nadff, D. and Kunz, A.: FLATIR: FTIR Multi-Touch Detection on a Discrete Distributed Sensor Array, TEI 2009, pp. 317-322, 2009.

- [65] Holland, S., Bouwer, A. J., Dalgelish, M. and Hurtig, T. M.: Feeling the Beat where it Counts: Fostering Multi-Limb Rhythm Skills with the Haptic Drum Kit, TEI 2010, pp.21-28, 2010.
- [66] Hoshi, T., Takahashi, M., Iwamoto, T. and Shinoda, H.: Non-Contact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound, Transactions on Haptics 3 (3), pp. 155-165, 2010.
- [67] Hylkema, B. S.: Examination of the Visual Field by Determining the Fusion Frequency, Acta Ophthalmologica 20 (2), pp. 181-193, 1942.
- [68] 五十嵐, 玉置, 池田, 栗田, 永田, 小笠 : 液体に対する力覚重畳による特性変化と水流提示法の提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2010.
- [69] Ince, G., Nakadai, K., Rodemann, T., Hasegawa, Y., Tsujino, H. and Imura, J.: Ego Noise Suppression of a Robot using Template Subtraction, IROS 2009, pp. 199-204, 2009.
- [70] 岩村 : “タッチ (神経心理学コレクション)”, 医学書院, 2001.
- [71] Iwata, H., Yano, H., Uemura, T. and Moriya, T.: Food Simulator: a Haptic Interface for Biting, VR 2004, pp. 51-57, 2004.
- [72] Izadi, S., Hodges, S., Taylor, S., Rosenfeld, D., Villar, N., Butler, A. and Westhues, J.: Going beyond the Display: A Surface Technology with an Electronically Switchable Diffuser, UIST 2008, pp. 269-278, 2008.
- [73] Janasen, Y., Karrer, T. and Borchers, J.: MudPad: Tactile Feedback and Haptic Texture Overlay for Touch Surfaces, ITS 2010, pp. 11-14, 2010.
- [74] Jota, R., Ng, A., Dietz, P. and Wigdor, D.: How Fast is Fast Enough?: A Study of the Effects of Latency in Direct-Touch Pointing Tasks, CHI 2013, pp. 2291-2300, 2013.
- [75] Jeon, S., Choi, S.: Haptic Augmented Reality: Taxonomy and an Example of Stiffness Modulation. Presence 18, pp. 87-408, 2009.
- [76] Jones, L. A. and Lederman, S.: “Human Hand Function”, Oxford University Press, 2006.
- [77] Jousmäki, V. and Hari, R.: Parchment-Skin Illusion: Sound-Biased Touch, Current Biology 8 (6), p. 190, 1998.
- [78] Kaaresoja, T., Anttila, E. and Hoggan, E.: The Effect of Tactile Feedback Latency in Touchscreen Interaction, WHC 2011, pp. 65-70, 2011.
- [79] Kaernbach, C.: Simple Adaptive Testing with the Weighted Up-Down Method. Perception & Psychophysics 49, pp. 227-229, 1991.
- [80] Katz, D: “Der Aufbau der Tastwelt”, Barth, 1925.
- [81] Kim, Y., Kim, S., Ha, T., Oakley, I., Woo, W. and Ryu, J.: Air-Jet Button Effects in AR, ICAT 2006, pp. 384-391, 2006.
- [82] Knorlein, B., Di Luca, M. and Harders, M.: Influence of Visual and Haptic Delays on Stiffness Perception in Augmented Reality, International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2009, pp. 49-52, 2009.

- [83] Koizumi, N., Tanaka, H., Uema, Y. and Inami, M.: Chewing Jockey: Augmented Food Texture by using Sound Based on Cross-Modal Effect, ACE 2011, 21, 2011.
- [84] Kratz, S. and Rohs, M.: HoverFlow: Expanding the Design Space of Around-Device Interaction, MobileHCI 2009, 4, 2009.
- [85] Kühner, M., Wild, J., Bubb, H., Bengler, K. and Schneider, J.: Haptic Perception of Viscous Friction of Rotary Switches, World Haptics Conference 2011, pp.587-591, 2011.
- [86] Kulkarni, S. D., Minor, M. A., Deaver, M.W. and Pardyjak, E.R.: Output Feedback Control of Wind Display in a Virtual Environment, ICRA 2007, pp. 832-839, 2007.
- [87] 國安, 福嶋, 古川, 梶本: 液体を注ぐ際の心地よさに着目した 触覚ディスプレイの提案, エンタテインメントコンピューティング 2010, 2010.
- [88] Kuschel, M. Luca, M. D., Buss, M. and Klatzky, R. L.: Combination and Integration in the Perception of Visual-Haptic Compliance Information, Transactions on Haptics 3 (4), pp. 234-244, 2010.
- [89] Kyung, K.U. and Lee, J.Y.: Ubi-Pen: A Haptic Interface with Texture and Vibrotactile Display, Computer Graphics and Applications 29 (1), pp. 56-64, 2009.
- [90] LaMotte, R.H.: Softness Discrimination with a Tool, Journal of Neurophysiology 83, pp. 1777-1786, 2000.
- [91] Lackner, J. R.: Some Proprioceptive Influences on the Perceptual Representation of Body Shape and Orientation, Brain 111 (2), pp. 281-297, 1988.
- [92] Lécuyer, A.: Simulating Haptic Feedback Using Vision: A survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback, Presence 18 (1), pp. 39-53, 2009.
- [93] Lécuyer, A., Burkhardt, J. M. and Etienne, L.: Feeling Bumps and Holes without a Haptic Interface: The Perception of Pseudo-Haptic Textures, CHI 2004, pp. 239-246, 2004.
- [94] Lécuyer, A., Burkhardt, J. M. and Tan, C. H.: A Study of the Modification of the Speed and Size of the Cursor for Simulating Pseudo-Haptic Bumps and Holes, Transactions on Applied Perceptions. 5 (3), 14, 2008.
- [95] Lécuyer, A., Congedo, M., Gentaz, E., Joly, O. and Coquillart, S.: Influence of Visual Feedback on Passive Tactile Perception of Speed and Spacing of Rotating Gratings, EuroHaptics 2010, pp. 73-78, 2010.
- [96] Lécuyer, A., Coquillart, S., Khedda, A., Richard, P. and Coiffet, P.: Pseudo-Haptic Feedback: Can Isometric Input Devices Simulate Force Feedback? , VR 2000, pp. 83-90, 2000.
- [97] Lederman, S. J. and Abbott, S. G.: Texture Perception: Studies of Intersensory Organization Using a Discrepancy Paradigm, and Visual Versus Tactual Psychophysics, Journal of Experimental Psychology 7 (4), pp. 902-915, 1981.



- [98] Lederman, S.J., Morgan, T., Hamilton, C. and Klatzky, R.L.: Integrating Multimodal Information about Surface Texture Via a Probe: Relative Contributions of Haptic and Touch-Produced Sound Sources, *Haptic 2002*, pp. 97- 104, 2002.
- [99] Lee, J. and Choi, S.: Effects of Haptic Guidance and Disturbance on Motor Learning: Potential Advantage of haptic Disturbance, *Haptics Symposium 2010*, pp.335- 342, 2010.
- [100] Lee, J.C., Dietz, P.H., Leigh, D., Yerazunis, W.S. and Hudson, S.E.: Haptic Pen: A Tactile Feedback Stylus for Touch Screens, *UIST 2004*, pp. 291–294, 2004.
- [101] Lévesque, V., Oram, L., MacLean, K., Cockburn, A., Marchuk, N. D., Johnson, d. Colgate, J. E. and Peshkin, M. A.: Enhancing Physicality in Touch Interaction with Programmable Friction, *CHI 2011*, pp. 2481-2490, 2011.
- [102] Lieberman, J. and Breazeal, C.: TIKL: Development of a Wearable Vibrotactile Feedback Suit for Improved Human Motor Learning, *Transaction on Robotics 23 (5)*, pp. 919-926, 2007.
- [103] Lindeman, R. W., Yanagida, Y., Hosaka, K. and Abe, S.; The TactaPack: A Wireless Sensor/Actuator Package for Physical Therapy Applications, *HAPTICS 2006*, pp. 337-341, 2006.
- [104] Lishman, J. R. and Lee, D. N.: The Autonomy of Visual Kinaesthesia, *Perception 2 (3)*, pp. 287-294, 1973.
- [105] Lylykangas, J., Surakka, V., Salminen K., Raisamo, J., Laitinen, P., Roning, K. and Raisamo, R.: Designing Tactile Feedback for Piezo Buttons, *CHI 2011*, pp. 3281-3284, 2011.
- [106] Nagano, H., Okamoto, S. and Yamada, Y.: Haptic Invitation of Textures: An Estimation of Human Touch Motions, *EuroHaptics 2012*, pp. 338-348, 2012.
- [107] Nakajima, T., Lehdonvirta, V., Tokunaga, E., Ayabe, M., Kimura, H. and Okuda, Y.: Lifestyle Ubiquitous Gaming: Making Daily Lives More Plesurable, *RTCSA 2007*, pp. 257-266, 2007.
- [108] Nakamura, H. and Miyashita, H.: Development and Evaluation of Interactive System for Synchronizing Electric Taste and Visual Content, *CHI2012*, pp. 517-520, 2012.
- [109] Narumi, T., Ban, Y., Kajinami, T., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Augmented Perception of Satiety: Controlling Food Consumption by Cahnging Apparent Size of Food with Augmented Reality, *CHI 2012*, pp. 109-118, 2012.
- [110] Narumi, T., Kajinami, T., Nishizaka, S., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Pseudo-Gustatory Display System Based on Cross-Modal Integration of Vision, Olfaction and Gustaion, *VR 2011*, pp. 127-130, 2011.
- [111] Narumi, T., Miyaura, M., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Simplification of Olfactoryh Stimuli in Pseudo-Gustory Displays, *Transactions on Visialization and Computer Graphics 20 (4)*, pp. 504-512, 2014.
- [112] Ng, A., Lepinski, J., Wigdor, D., Sanders, S. and Dietz, P.: Designing for Low-Latency Direct-Touch Input, *UIST 2012*, pp. 453-464, 2012.

- [113] Ng, A., Annett, M., Dietz, P., Gupta, A. and Bischof, W. F.: In the Blink of Eye: Investigating Latency Perception during Stylus Interaction, CHI 2014, pp. 1103-1112, 2014.
- [114] Ngo, K. M. Velasco, C., Salgado, A., Boehm, E., O'Neill, D. and Spence, C.: Assessing Crossmodal Correspondences in Exotic Fruit Juices: The Case of Shape and Sound Symbolism, *Food Quality and Preference* 28 (1), pp. 361-369, 2013.
- [115] Nojima, T., Sekiguchi, D., Inami, M., Tachi, S.: The SmartTool: A System for Augmented Reality of Haptics, VR 2002, pp. 67-72, 2002.
- [116] Makino, Y. and Shinoda, H.: Suction Pressure Tactile Display Using Dual Temporal Stimulation Modes, SICE 2005, pp. 1285-1288, 2005.
- [117] Mäki-Patola, T. and Hamalainen, P.: Latency Tolerance for Gesture Controlled Continuous Sound Instrument without Tactile Feedback, ICMC 2004, 2004.
- [118] Malik, S. and Laszlo, J.: Visual Touchpad: A Two-Handed Gestural Input Device, ICMI 2004, pp. 289-296, 2004
- [119] Massie, T. H. and Salisbury, J. K.: The Phantom Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, *Dynamic Systems and Control Divisions* 55, pp. 295-299, 1994.
- [120] Matoba, Y., Sato, T., Takahashi, N. and Koike, H.: ClaytricSurface: An Interactive Surface with Dynamic Softness Control Capability, SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies, 2012.
- [121] Matsushita, N. and Rekimoto, J.: HoloWall: Designing a Finger, Hand, Body, and Object Sensitive Wall, UIST 1997, pp. 209-210, 1997.
- [122] McMahan, W. and Kuchenbecker, K. J.: Spectral Subtraction of Robot Motion Noise for Improved Event Detection in Tactile Acceleration Signals, EuroHaptics 2012 1, pp. 326-377, 2012.
- [123] Minamizawa, K., Fukamachi, S., Kajimoto, H., Kawakami, N. and Tachi, S.: GravityGrabber: Wearable Haptic Display to Present Virtual Mass Sensation, SIGGRAPH Emerging Technologies, 2007.
- [124] Minamizawa, K., Kakehi, Y., Nakatani, M., Mihara, S. and Tachi, S.: TECHTILE toolkit, SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies, 2012.
- [125] Miyaoka, T. and Nakamura, T.: Measurements of Detection Thresholds Presenting Normal and Tangent Vibrations on Human Hairy Skin, *International Society for Psychophysics* 22, pp. 229-232, 2006.
- [126] Moeller, J. and Kerne, A.: ZeroTouch: An Optical Multi-Touch and Free-Air Interaction Architecture, CHI 2012, pp. 2165-2174, 2012
- [127] 三輪：落下する身体のリアリズムー初期ディズニーからピクサーへー，*学習院大学人文科学論集* XIX， 2010.
- [128] Moon, T. and Kim, G. J.: Design and Evaluation of a Wind Display for Virtual Reality, VRST 2004, pp. 122-128, 2004.

- [129] 森本, 宮下 : HAMIGAKI-K.O.: 歯ブラシ付き iPhone によるオンライン対戦. エンタテインメントコンピューティング 2009 論文集, pp. 183-184, 2009.
- [130] Murray, D. J., Ellis, R.R. and Bandomir, C. A.: Charpentier (1891) on the Size-Weight Illusion, Perception and Psychophysics 61 (8), pp. 1681-1685, 1999.
- [131] Ohnishi, H. and Mochizuki, K.: Effect of Delay of Feedback Force on Perception of Elastic Force: A Psychophysical Approach, Transactions on Communications E90-B (1), pp. 12-20, 2007.
- [132] 大山, 今井, 和氣 : ”新編感覚・知覚心理学ハンドブック”, 誠信書店, pp. 1169-1315, 1994.
- [133] Okamoto, S., Konyo, M, Saga, S. and Tadokoro, S.: Detectability and Perceptual Consequences of Delayed Feedback in a Vibrotactile Texture Display, Transaction on Haptics 2 (2), pp. 73-84, 2009.
- [134] Okamura, A.M., Cutkosky, M. and Dennerlein, J.: Reality Based Models for Vibration Feedback in Virtual Environments, Transactions on Mechatronics 6, pp. 245–252, 2001.
- [135] Oral-B: Oral-B Professional Care SmartSeries 5000 with SmartGuide Electric Toothbrush, <http://www.oralb.com/products/professional-care-smart-series-5000/> (Accessed 23 September 2014).
- [136] Pavani, F., Spence, C. and Driver, J.: Visual Capture of Touch: Out-of-the- Body Experience with Rubber Gloves, Psychological Science 11 (5), pp. 353-359, 2000.
- [137] Paljic, A., Burkhardt, J. M. and Coquillart, S.: Evaluation of Pseudo-Haptic Feedback for Simulating Torque: A Comparison between Isometric and Elastic Input Devices, Haptics 2004, pp. 216-223, 2004.
- [138] Pedersen, E. W. and Hornbæk, K.: Expressive Touch: Studying Tapping Force on Tabletops, CHI2014, pp. 421-430, 2014.
- [139] Piqueras-Fiszman, B. and Spence, C.: Colour, Pleasantness, and Consumption Behaviour within a Meal, Appetite 75 (1), pp. 165-172, 2014.
- [140] Porquis, L. B. C., Konyo, M. and Tadokoro, S.: Tactile-Based Torque Illusion Controlled by Strain Distributions on Multi-Finger Contact, Haptics Symposium 2012, pp. 393-398, 2012.
- [141] Poupyrev, I. and S. Maruyama.: Tactile Interfaces for Small Touch Screens, UIST 2003, pp.217-220, 2003.
- [142] Pusch, A., Martin, O. and Coquillart, S.: HEMP-Hand-Displacement-Based-Pseudo-Haptics: A Study of a Force Field Application, 3DUI 2009, pp. 59-66, 2009.
- [143] Rank, M. Shi, Z., Müller, M. H. and Hirche, S.: Perception of Delay in Haptic Telepresence System. Presence19 (5), pp. 389-399, 2010.
- [144] Rekimoto, J.: SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces, CHI 2002, pp. 113-120, 2002.

- [145] Rock, I., and Victor, J.: An Experimentally Created Conflict between the Two Senses, *Science* 143, pp. 594-596, 1964.
- [146] Romano, J. M. and Kuchenbecker, K. J.: Creating Realistic Virtual Textures from Contact Acceleration Data, *Transactions on Haptics* 5 (2), pp. 109-119, 2012.
- [147] Romano, J. M., Yoshioka, T. and Kuchenbecker, K. J.: Automatic Filter Design for Synthesis of Haptic Textures from Recorded Acceleration Data, *ICRA 2010*, pp. 1815-1821, 2010.
- [148] Rosenberg, L. B.: Virtual Fixtures: Perceptual Tools for Telerobotic Manipulation, *VR 1993*, pp.76-82, 1993.
- [149] Saga, S. and Deguchi, K.: Lateral-Force-Based 2.5-Dimensional Tactile Display for Touch Screen. *Haptics Symposium 2012*, pp. 15-22, 2012.
- [150] Saga, S., Kawakami, H. and Tachi, S.: Haptic Teaching using Opposite Force Presentation, *World Haptics Conference 2007*.
- [151] Sakurai, S., Narumi, T., Ban, Y., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Affecting Our Perception of Satiety by Changing the Size of Virtual Dishes Displayed with a Tabletop Display, *HCI 2013*, pp. 90-99, 2013.
- [152] Samsung: SUR40 for Microsoft Surface 2.0, <http://www.samsung.com/uk/business/business-products/smart-signage/specialised-display/LH40SFWTGC/EN> (Accessed 23 September 2014).
- [153] 佐藤, 橋本, 梶本 : カメラ回転時の「カチカチ感」付与による操作感向上, *インタラクシオン 2008*, 2008.
- [154] Sawada, E., Ida, S., Awaji, T., Morishita, K., Aruga, T., Takeichi, R., Fujii, T., Kimura, H., Nakamura, T., Furukawa, M., Shimizu, N., Tokiwa, T., Nii, H., Sugimoto, M. and Inami, M.: BYU-BYU-View, a Wind Communication Interface. *SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies*, 2007.
- [155] Sodhi, R., Glisson, M., Poupyrev, I., Rothera, A. and Dauner, J.: AIREAL: Tactile Gaming Experiences in Free Air. *SIGGRAPH 2013 Emerging Technologies*, 2013.
- [156] Spence, C.: Auditory Contributions to Flavour Perception and Feeding Behaviour, *Physiology and Behavior* 107 (4), pp. 505-515, 2012.
- [157] Spence, C.: Multisensory Flavour Perception, *Current Biology* 23 (9), pp. 365-369, 2013.
- [158] Srinivasan, M.A., Beauregard, G.L. and Brock, D.L.: The Impact of Visual Information on Haptic Perception of Stiffness in Virtual Environments, *Dynamics Systems and Control Division* 58, pp.555-559, 1996.
- [159] Starner, T., Leibe, B., Minnen, D., Westeyn, T., Hurst, A. and Weeks, J.: The Perceptive Workbench: Computer-Vision-Based Gesture Tracking, Object Tracking, and 3D Reconstruction for Augmented Desks, *Machine Vision and Applications* 14, pp. 59-71, 2003.

- [160] Subramanian, S., Aliakseyeu, D. and Lucero, A.: Multi-Layer Interaction for Digital Tables, UIST 2006, pp. 296-272, 2006.
- [161] Suzuki, Y. and Kobayashi, M.: Air Jet Driven Force Feedback in Virtual Reality, *Computer Graphics and Applications* 25 (1), pp. 44-47, 2006.
- [162] 館, 佐藤, 廣瀬: “バーチャルリアリティ学”, 工業調査会, 2010.
- [163] Tactus Technology, Inc.: Taking Touch Screen Interfaces into a New Dimension, A Tactus Technology White Paper, 2012.
- [164] 高橋, 國安, 佐藤, 福嶋, 古川, 橋本, 梶本: 口腔内動作を入出力とする触覚コミュニケーションデバイス, *ヒューマンインタフェース学会論文誌* 13 (4), pp.53-62, 2011.
- [165] Takeoka, Y, Miyaki, T. and Rekimoto, J.: Z-Touch: An Infrastructure for 3D Gesture Interaction in the Proximity of Tabletop Surface, ITS 2010, pp. 91-94, 2010.
- [166] Tanikawa, T. and Hirose, M.: A Study of Multi-Modal System with Visual Feedback, *International Symposium on Universal Communication*, 285-292, 2008.
- [167] 谷本: ”筋トレまるわかり大辞典“, ベースボール・マガジン社, 2010.
- [168] 手塚: “漫画の書き方—似顔絵から長編まで”, 光文社知恵の森文庫, 1996.
- [169] Terziman, L., Marchal, M., Multon, F., Arnaldi, B., and Lécuyer, A.: The King-Kong Effects: Improving Sensation of Walking in VR with Visual and Tactile Vibrations at each Step, 3DUI 2012, pp.19-26, 2012.
- [170] Thomas, F. and Johnston, O. “The Illusion of Life: Disney Animation”, Abbeville Press, 1981.
- [171] 友田, 上杉, 三輪: 上腕への腱振動刺激と他動運動による 過伸展錯覚の特性, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌* 4 (3), pp. 361-369, 2009.
- [172] 内川: “講座<感覚・知覚の科学>3 聴覚・触覚・前庭感覚”, 朝倉書店, pp. 102-177, 2008.
- [173] Van Der Linden, J., Johnson, R., Bird, J., Rogers, Y. and Schoonderwaldt, E.: Buzzing to Play: Lessons Learned from an in the Wild Study of Real-Time Vibrotactile Feedback, CHI 2011, pp. 533-542, 2011.
- [174] Van Erp, J. B. F., Hans, J. A. V. and Van Veen, H. A. H. C.: A Tactile Cockpit Instrument to Support Altitude Control, *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 47 (1), pp. 114-118, 2003.
- [175] Van Erp, J. B. F., Saturday, I. and Jansen, C.: Application of Tactile Displays in Sports: Where to, How and When to Move, HAPTICS 2006, pp.90-95, 2006.
- [176] Wansink, B. and Ittersum, K. V.: Bottoms Up! The Influence of Elongation on Pouring and Consumption Volume, *Journal of Consumer Research* 30, pp. 455-463, 2003.

- [177] Wansink, B., Ittersum, K. V. and Painter, J. E.: Ice Cream Illusions Bowls, Spoons, and Self-Served Portion Sizes, *American Journal of Preventive Medicine* 31, pp. 240-243, 2006.
- [178] Watanabe, K.: VisualHaptics, <http://www.persistent.org/VisualHapticsWeb.html> (Accessed 23 September 2014).
- [179] Watanabe, K. and Yasumura, M.: VisualHaptics: Generating Haptic Sensation using only Visual Cues, *ACE 2008*, p. 405, 2008.
- [180] Weiss, M., Wacharamanotham, C., Voelker, S., and Borchers, J.: FingerFlux: Near-Surface Haptic Feedback on Tabletops, *UIST 2011*, pp. 615-620, 2011.
- [181] Wellman, P. and Howe, R.D.: Towards Realistic Display in Virtual Environments, *Dynamic Systems and Control Division* 57, pp. 713-718, 1995.
- [182] Wigdor, D., Forlines, C., Baudisch, P., Barnwell, J. and Shen, C.: LucidTouch: A See-Through Mobile Device, *UIST 2007*, pp. 269-278, 2007.
- [183] Wilson, A.: TouchLight: An Imaging Touch Screen and Display for Gesture-Based Interaction, *ICMI 2004*, pp. 69-76, 2004.
- [184] Wilson, A. D.: Using a Depth Camera as a Touch Sensor, *ITS 2010*, pp. 69-72, 2010.
- [185] Wilson, A. and Benko, H.: Combining Multiple Depth Cameras and Projectors for Interactions on, above and between Surfaces, *UIST 2010*, pp. 273-282, 2010.
- [186] Winfield, L., Glassmire, J., Colgate, J. E. and Peshkin, M.: T-Pad: Tactile Pattern Display through Variable Friction Reduction. *EuroHaptics 2007*, pp.421-426, 2007.
- [187] Wintergerst, G., Jagodzinski, R., Fabian, H., Müller, A. and Joost, G.: Reflective Haptics: Enhancing Stylus-Based Interactions on Touch Screens, *EuroHaptics 2010 1*, pp. 360-366, 2010.
- [188] 山岡, 木村, 川鍋, 大嶋, 中垣, 速水, 箕 : TagCandy : 棒付き飴の食感拡張デバイスの提案, 芸術科学会 NICOGRAPH, 2011.
- [189] Yamaoka, M., Yamamoto, A. and Higuchi, T.: Basic Analysis of Stickness Sensation for Tactile Displays, *EuroHaptics 2008*, pp. 427-436, 2008.
- [190] 山岡, 山本, 樋口 : 真空吸引圧を用いた粘着摩擦感の再現提示に関する研究, 第 13 回日本バーチャルリアリティ学会, pp. 477-450, 2008.
- [191] Yao, H.-Y., Hayward, V.: Design and Analysis of a Recoil-Type Vibrotactile Transducer, *Journal of the Acoustical Society of America* 128, 619-627, 2010.
- [192] Yoshida, S., Mizota, T. and Noma, H.: Development of an Integrated Multi-Axis Tactile Sensor: Distributed Preprocessing for Tactile Recognitions. *VR 2007*, pp. 281-282, 2007.
- [193] Yoshimoto, S., Hamada, Y., Tokui, T., Suetake, T., Imura, M., Kuroda, Y. and Oshiro, O.: Haptic Canvas: Dilatant Fluid Based Haptic Interaction. *SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, 2010.

- [194] Zampini, M., Guest, S. and Spence, C.: The Role of Auditory Cues in Modulating the Perception of Electric Toothbrushes, *Journal of Dental Research* 82 (11), pp. 929-932, 2003.
- [195] Zampini, M., and Spence, C.: The Role of Auditory Cues in Modulating the Perceived Crispness and Staleness of Potato Chips, *Journal of Sensory Studies* 19, 5, pp. 347-363, 2005.