

Title	音響生成手法に基づく身体動作を考慮した触覚レンダリングの研究
Sub Title	Study on haptic rendering with body motion based on sound rendering
Author	花光, 宣尚(Hanamitsu, Nobuhisa) 加藤, 朗(Kato, Akira)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2013
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2013年度メディアデザイン学 第322号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002013-0322

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2013年度（平成25年度）

音響生成手法に基づく
身体動作を考慮した触覚レンダリングの研究

慶應義塾大学大学院
メディアデザイン研究科

花光 宣尚

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学)授与の要件として提出した修士論文である。

花光 宣尚

審査委員：

加藤 朗 教授 (主査)

南澤 孝太 准教授 (副査)

徳久 悟 特任講師 (副査)

修士論文 2013年度 (平成25年度)

音響生成手法に基づく
身体動作を考慮した触覚レンダリングの研究

カテゴリー：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

現在のコンテンツ産業では、古くから情報提示技術の発展と、それと平行してコンテンツを創るための技術が相互に発展してきた。そして現在では視覚や聴覚の再現だけでなく、日常生活における風景や音の再現を超えた、独自の表現方法が確立しつつある。一方、触覚の分野では、物理シミュレーションを用いた実空間の再現による触覚の再現手法や、触感の再現環境を限定し計算コストを抑えてモデル化することによる触感の再現手法、計算を全く行わず触感を音響信号を用いて記録することによる触感の記録手法などといった、情報提示技術は発展してきているものの、触覚を伴うコンテンツを創るための手法や技術は未だ、確立できていない。この現状を解決するためには、現在のコンテンツ産業を支えるコンテンツ創造技術と同様に、専門的スキルや技術的ハードルを必要としないユーザが気軽にコンテンツを創ることができる環境が必要である。そこで本研究では、従来の触感再現手法で要求される計算コストを抑え、且つ触感の再現環境を限定しないで触感を再現できる手法を提案する。さらにその手法を用いてシステムの構築を行い、実際にそのシステムに沿って試作コンテンツを作成した。

キーワード：

触覚レンダリング, 振動解析, サンプリング触源, 触覚生成, バーチャルリアリティ

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

花光 宣尚

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2013

Study on Haptic Rendering with Body Motion Based on
Sound Rendering.

Category: Science / Engineering

Summary

In current content industries, technologies and tools for creating contents are developing since a very long time ago. and tools not only display perceptions of seeing and hearing but also create original expressive styles, like visual effects or sound effects. On the other hand, in haptic area, haptic rendering technologies which are physically based haptic rendering, modeling based haptic rendering and sound signal recording based haptic recorder, are developing. But tools for creating contents include haptics, like photoshop, illustrator, MIDI and pro tools, doesn't appear now. This paper provides easy-to-make and easy-to-use haptic rendering methods for creating contents tool and develop a system by the method and create a prototype content.

Keywords:

Haptic Rendering, Vibrotactile Analysis, Tactile source, Haptic Generation, Virtual Reality

Graduate School of Media Design, Keio University

Nobuhisa Hanamitsu

目 次

第 1 章 序論	1
1.1. はじめに	1
1.2. 音響コンテンツの歴史	2
1.3. 触覚を扱うコンテンツの歴史	4
1.4. 触感の創造	5
1.5. 本論文の構成	6
第 2 章 ヒトの触覚と触感提示技術	7
2.1. 触覚知覚の構造と働き	7
2.1.1 皮膚構造	7
2.1.2 皮膚機械受容器	8
2.1.3 受動触と能動触	9
2.1.4 運動に関する錯触覚	10
2.2. 従来の触覚再現手法	12
2.2.1 物理シミュレータを用いた触感の再現	12
2.2.2 触感のモデル化による触感の再現	13
2.2.3 触感の記録による触感の再現	14
2.2.4 触覚を伴うコンテンツ生成に着目した研究	14
2.3. 本章のまとめ	16
第 3 章 コンテンツ創造に向けた触感の再現手法の提案	17
3.1. 触感レンダリングの検討	18
3.1.1 固体伝搬する振動の再現に着目した触感レンダリングの検討	18
3.1.2 FDTD 法を用いた振動伝搬シミュレータの検討	23

3.2.	触源のサンプリングとインパルス列の畳込みによる振動の再現 . . .	26
3.2.1	触源のサンプリングとインパルス列の計算	26
3.2.2	身体動作と連動した触感レンダリング	31
3.3.	触源のサンプリングからコンテンツ制作までの過程	32
3.3.1	触感のサンプリング	32
3.3.2	コンテンツ制作と触体験までの過程	32
第 4 章	提案手法の実装	34
4.1.	触源の記録・セットの作製	34
4.1.1	触録環境・機器	34
4.1.2	触源セット	36
4.2.	触感レンダリング	38
4.3.	デバイスの試作	41
4.3.1	1st プロトタイプ	41
4.3.2	2st プロトタイプ	42
4.3.3	3st プロトタイプ	43
4.3.4	4th プロトタイプ	44
4.3.5	5th プロトタイプ	45
4.4.	試作コンテンツ	46
第 5 章	検証実験	48
5.1.	合成の実験	48
5.1.1	重さパラメータの変化による触感の変化	49
5.1.2	弾性係数の変化による触感の変化	50
5.2.	空間性の実験	51
5.2.1	恒常法による触感の解像度の検証	51
5.2.2	触感の絶対位置の検証	57
5.2.3	本章のまとめ	61
第 6 章	結論	62
6.1.	おわりに	62

謝辞	64
参考文献	65

目 次

1.1	音響コンテンツに関わる技術の歴史	3
1.2	sensorama	5
1.3	XBOXONE インパルストリガー	5
2.1	皮膚の断面構造	8
2.2	各受容器別の知覚特性	9
2.3	ファントムセンセーションの例	10
2.4	跳躍現象	11
2.5	連続的な刺激での触刺激の位置の変位現象	11
2.6	触覚ディスプレイ：SPIDAR	12
2.7	須佐らの硬さや摩擦感のレンダリング	12
2.8	Yao らの筒を転がる感じの再現	13
2.9	Kuchenbecker らの Haptography	13
2.10	徳利のとくとく感の再現	13
2.11	TECHTILE toolkit	14
2.12	Colorful touch Palette	15
2.13	数種類のテクスチャパターン	15
2.14	Haptic Editor	16
2.15	なぞりによるテクスチャ感のコピー	16
3.1	FoleyAutomatic	18
3.2	音生成パイプライン	19
3.3	接触時の剛体同士の接触に関わるパラメータ	19
3.4	Slide に関わる運動力学方程式の図	20

3.5	Rolling に関わる運動力学方程式の図	20
3.6	固体伝搬振動の生成パイプライン	22
3.7	FDTD 法で扱われる 2 次元スタガード格子の空間方向の格子配置 イメージ	23
3.8	シミュレーション結果	24
3.9	実際の銅板の触感とレンダリングした振動の比較	25
3.10	サンプリング触源と TactileForce による触感の再現	27
3.11	周波数スペクトルグラム	28
3.12	音発時間検出を適応した結果	28
3.13	記録例：ビニール球	28
3.14	記録例：500 円玉	28
3.15	記録例：サイコロ	28
3.16	ROBOMECH にて合成触感を体験する場面	29
3.17	記録した振動からインパルス列を抽出, サンプリング触源を畳み込 んだ例	30
3.18	身体動作を考慮した TactileForce とサンプリング触源の畳み込みの例	31
3.19	録音例：STARWARS のビームの音	32
3.20	アサシンクリード 4 の作中でのクジラが出てくる場面に使われた音 の記録方法	32
4.1	マイクの種類	35
4.2	Roland DUO-CAPTURE EX と audio-technica マイクアンプ AT- MA2	35
4.3	記録装置, 記録用のカメラ	36
4.4	今回使用した素材	36
4.5	素材の落とす前の風景	37
4.6	アクリル板にビー玉を落下させる風景	37
4.7	触源セット	37
4.8	触感レンダリングのフローチャート	38
4.9	3 軸加速度センサ AS-3ACC-3	38

4.10	Arduino	38
4.11	シミュレータ部	39
4.12	シリアル通信部：青い枠内はシリアルポート設定ウィンドウ	40
4.13	Tactile Force 部	40
4.14	提示物体：箱 片手タイプ	41
4.15	箱を振る体験者	41
4.16	提示物体：箱 両手タイプ	42
4.17	箱を傾ける体験者	42
4.18	透明の箱と同じ大きさのバーチャルな箱を設計	43
4.19	3rd プロトタイプ 画面付き	44
4.20	4th プロトタイプ 画面付き	44
4.21	5th プロトタイプ 画面付き	45
4.22	シミュレータ画面	46
4.23	コントロールパネル	46
4.24	コントロールパネル 触源セットの選択	47
4.25	スーパーボールの触感 選択時	47
4.26	スーパーボール時のシミュレータ画面	47
5.1	実験環境	48
5.2	恒常法による振動分布の解像度 横：被験者 A	52
5.3	恒常法による振動分布の解像度 縦：被験者 A	52
5.4	恒常法による振動分布の解像度 横：被験者 B	53
5.5	恒常法による振動分布の解像度 縦：被験者 B	53
5.6	恒常法による振動分布の解像度 横：被験者 C	54
5.7	恒常法による振動分布の解像度 縦：被験者 C	54
5.8	恒常法による振動分布の解像度の平均の結果	55
5.9	15mm 間隔でディスプレイに提示したドット	58
5.10	ディスプレイに提示されているドット	58
5.11	被験者 3 人の絶対位置の回答結果	59
5.12	絶対位置の回答結果	59

第1章 序

論

1.1. はじめに

現在の視聴覚コンテンツを支える技術に”コンテンツを創るためのツール”が存在する。例えば、映像なら、記録のためのツールがカメラであり、編集のためのツールがPhotoshopである。同様に、音ならマイクが使われ、Pro Toolsで編集される。現在の視聴覚コンテンツを支える科学技術は、情報を提示することだけでなく、コンテンツを創るためのツールとしての技術が相互的に発展してきた。この背景には、最先端技術を用いた専門性の高いシステムから技術的ハードルが低くアマチュアレベルでもある程度のクオリティを保ったコンテンツを実現できるシステムが存在するからこそ、私達は映像や音楽をコンテンツのひとつとして楽しむことができる。

一方、触覚の分野においては、情報提示技術は発展しているものの、コンテンツを創るためのツールは未だ存在していない。映像や音楽のようにまた見たい・聴いていたいといった触覚でいう「ずっと触っていたい、また触りたくなる」といったものに私自身であったことがない。この現状には、触覚を創る人や触覚を軸にしたアーティストが存在していないからだと考える。この現状を解決するためには、現在のコンテンツ産業を支えるコンテンツ創造技術と同様に、専門的スキルや技術的ハードルを必要としないユーザが気軽にコンテンツを創ることができる環境が必要である。

1.2. 音響コンテンツの歴史

音や光を電氣的な手段で作り出す技術は、19世紀から進められ、現在では非常に高度なものが普及している。その結果、既に成熟しているコンテンツとして現在の”一般的な娯楽”の地位を確立した。音響生成の技術の歴史を辿り、音を作り出す技術はどのように発展し現在の地位を確立したのかを振り返ってみる [図 1.1]。音の作り出す歴史の始まりは、1877年エジソンが開発したフォノグラフである。ここでは純粹に記録した音を再現した発明であった。この蠟でできた筒にサファイア針で空気の振動を刻みこみ音を記録する手法は、現在では姿を変え、蠟の代わりに、振動を電子的に刻みこんでいるだけでその本質自体は変わっていない。音を電子的に記録できるということは、言い換えれば電子的に再現できるといえる。1951年には、現在も保管されている第一世代目の電子計算機である CSIRAC [1] によって世界で初めてコンピュータで音が演奏される。その後、計算機を用いて電氣的な手段で音を再現する（厳密には合成する）ことを試みた最初の事例は、1957年ベル研究所に居た Max Mathews らの Music I である。この音の合成は MUSIC-N シリーズとして研究が進められ、MUSIC V ではトーンジェネレータをユニット化し複数個配列する方式を取り入れ、既存の楽器音を合成することが可能になった。1967年には、Chowning によって、周波数変調を応用することによる音色合成方式である FM 音源のアルゴリズムを提案した。1974年に YAMAHA はこの FM 音源のアルゴリズムのライセンスを取得し、現在の DX シリーズにつながっている。1970年後半には、デジタルシンセサイザやデジタル信号処理に特化した DSP システムが登場し、リアルタイムでの合成音の生成が可能になった。1980年代半ばには、安価なデジタルシンセサイザが登場し、MIDI 規格の登場 (1983) によってこれまで各社別の規格を用いていたものが統一された [2]。この規格の統一によって YAMAHA や Roland が独自に設計し提供していた音源セットを扱えるようになり、以後パソコン通信による MIDI データの共有によって大きく広がった。当時、the Beatles などの一部の音楽グループが電子音楽を使ったことが、現在の地位を確立に一役買ったものだろう。以後、音の再現の研究は発展し、物理モデルを用いた音の再現の研究 サウンドレンダリングは、録音した音と区別がつかないほどである。サウンドレンダリングは、Takala らによって設計されている [3]。物理モデ

ルを用いたサウンドシンセサスの手法から擦れた音の生成, 衝撃に関する音の構造や空気伝搬する音ドップラー効果などを含めた音響特性をにおけるレンダリング手法を提案している. 1996年, Kees van den Doel らによって, 衝突音や摩擦音, 回転音などを生成する研究が行われた Doel らの研究では音の生成に 3DCG レンダリングのパラメータを用いているため, サウンドシンセサイズに近いものである. 一方, 同時期に発表された Synthesizing Sounds from Physically Based Motion では, 弾性体を FEM で設計し, その弾性中を伝搬する振動を計算した上で音のフルレンダリングを実現した [4]. しかし当時のと生成では, 音はなっているが 3 DCG で表現された物体から発生するリアルな音とは異なり, 電子音に近い音も見られた. その後, Doug らによって高品質なサウンドレンダリングを実現するためのモーダル場生成の研究 [5] やモーダル計算の高速化の研究 [6], 接触音の高品質化の研究 [7] によって, 現在では粉碎音や衝撃音 [8] を実際の音と区別がつかないほどの品質でレンダリングを実現している. これらの研究では, 視聴覚コンテンツにおける音響の自動設定を目標としており, これまで音響コンテンツで使われていた, 記録した生音や合成した音や電子音を利用した手法に次いで, 新しい手法として映画などの場面で取り入れられつつある.

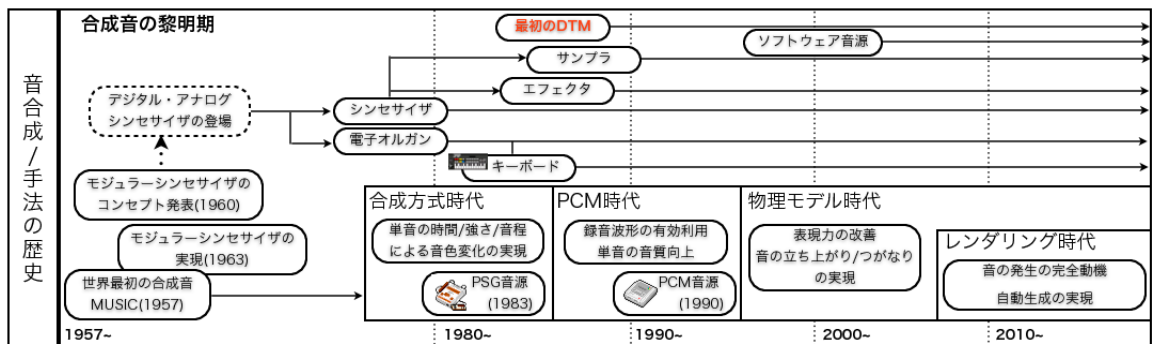


図 1.1: 音響コンテンツに関わる技術の歴史

1.3. 触覚を扱うコンテンツの歴史

触覚を扱ったコンテンツも、これまでに見られている。古くは1962年に登場したsensoramaという装置がある[図1.2]。sensorama [9]は”Cinema of the future”を目指し、三次元映像・広視野・モーションライド・ステレオ・匂いや風、そして振動の提示を複合した体感型の映画鑑賞を実現している。また初めて触覚がエンタテインメントシステムに取り入れられた事例は、1976年にSEGAから発表されたアーケードゲーム”Moto-cross [10]”であり、ハンドルからエンジンに見立てた振動や衝突を提示するものであった。その後、触覚を取り入れたエンタテインメントシステムは、アフターバーナーII [11]のように体全体で変化を感じるものや、背中に音と振動を提示する機器を背負い、操作するAura Interactor [12]。など、主に大きな機材を使用するものが多く見られた [12]。1997年任天堂が発売した振動パック [13]やSONYのDUALSHOCK [14]は、家庭用エンタテインメントシステムに触覚を取り込んだ事例であり、この時期を境に家庭用エンタテインメントシステムには欠かせない存在となった。その後、身体動作を取り入れたNintendo WiiのコントローラWii Remote [15]やMicrosoft KINECT [16]による身体動作のキャプチャなど徐々に取り入れられ始めている。最近の動向では、2013年に発表されたXBOX ONEのインパルストリガー [17]では、左右のトリガーボタンの中にアクチュエータを取り付けており、自動車のエンジンの振動や銃のハンマーアクションの衝撃を提示することができる [図1.3]。今後、従来のものと比較し、再現性を持った触覚を扱ったコンテンツが出てくることが期待される。この事例は近い将来、映像や音楽のように触覚を楽しむ（触った感じを自分自身の体験として感じる）という状況を予感させる。しかしながら、従来の触覚提示手法では、過去に発売された振動パックやDUALSHOCKで提示されていた単純な振動パターンしか提示できないため「ブルブル」震える表現の域を超えることが出来なかった。一方である程度、触覚の再現性をもつ触覚提示装置では、装置の機構が複雑化し、例えば家庭用としての普及が見込めないなどの問題を抱えているのが現状である。加えて、2014年現在、従来のものと比較し、再現性を持った触覚を扱ったコンテンツが徐々に存在するようになってきたものの「ずっと触っていたい、また触りたくなる」ようなコンテンツが存在するような気配は見られない。



図 1.2: sensorama [9]



図 1.3: XBOXONE インパルストリガー [18]

1.4. 触感の創造

現状として、触覚が映像や音楽と大きく違うのは、自分で作ることができないことであり、そして事実自分で作れる環境が未だ存在しないように思える。音楽では、技術発展とともにアーティストが電子楽器を使ってパフォーマンスを行なったからこそ、今の地位を確立した。触覚においても研究レベルでは再現ができるようになってきているものの、過去の音楽の背景と同じ流れは見られない。触覚においても芸術や娯楽の領域で触感が扱われていくことが、触感を作ることに長けたデザイナーや触感のアーティストを生み出し、さらに触感を身近なものとなり「ずっと触っていたい、また触りたくなる」ようなものが生まれてくるのではないだろうか。

本研究の目標は、将来触感を作ることに長けたデザイナーや触感のアーティストを創出することを目指し、音楽でのデジタルシンセサイザや MIDI のような、触覚に関わる専門的知識がなくても触感を操作・編集・創造できる手法を提案する。

1.5. 本論文の構成

本研究では本章で述べた背景を元に、音響コンテンツが一般的なものとして受け入れられているように、触覚に関わる専門的知識がなくても触感を操作・編集・創造できる手法を提案する。具体的には、第1章では、本研究の背景について、音響生成技術と音響コンテンツの関係を辿り「ずっと触っていたい、また触りたくなる」ような触感コンテンツ実現のための手法を述べる。第2章では、触知覚における原理とこれまでの触感生成の研究を紹介する。第3章では、触感コンテンツを作るための専門的知識を要求しない触感生成手法を提案する。第4章では、本研究で行なった音響生成手法に基づく身体動作と連動した触感レンダリングの設計と実装について述べる。第5章では、実装したシステムの検証実験と結果について述べる。第6章では、本研究の結論について述べる。

第2章

ヒトの触覚と触感提示技術

2.1. 触覚知覚の構造と働き

触覚は、ヒトと外界の物体との物理的接触によって生じる感覚である。この点で視覚や聴覚とは大きく異なり、見る聴くといった知覚動作が対象物に変化を与えることが一切ないのに対し、触覚では物体を触ることで、対象物の形状に変化が生じ、触れた皮膚も変形するヒトと物体の双方向の関係性を持っている感覚である。本章では、触覚の知覚原理について述べる。

2.1.1 皮膚構造

触覚には大きく、皮膚感覚と深部感覚に分類される。皮膚感覚は主に圧覚、振動覚、温冷覚、痛覚などの情報を得るために、いくつかの感覚受容器が存在する。そのような皮膚感覚のメカニズムを理解するために、皮膚感覚を構成する需要期は、感覚様相に応じて大きく3つ、触覚受容器、温度受容器、障害受容器に分類される [19]。3つの受容器のなかでも、物理的接触に大きく関わる皮膚変形に注目すると、皮膚変形に纏わる触覚受容器は4つ存在し、それぞれ皮膚側からマイスナー小体、メルケル小体、ルフィニ小体、パチニ小体と呼ばれている [図 2.1]。またこれら4つの機械受容器は単一の情報に対して応答しているわけではなく、複合的に応答しているが、それぞれの知覚特性が異なっている。

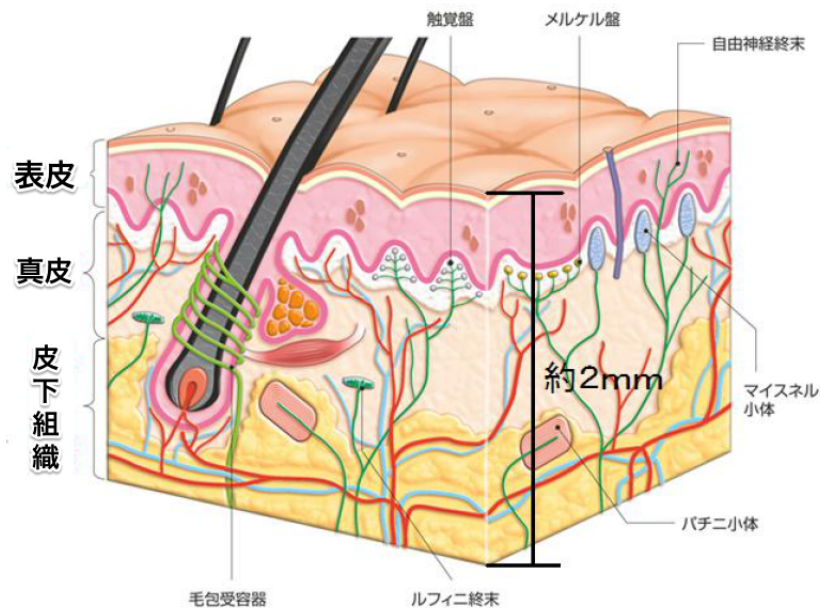


図 2.1: 皮膚の断面構造 [19] より再構成

2.1.2 皮膚機械受容器

ここでは前述した機械受容器のそれぞれの特徴を述べる。マイスナー小体は、周波数領域は 1Hz~300Hz, 最も知覚する周波数は 50Hz であり特に皮膚の垂直変形で応答し、メルケル小体は、周波数領域は 0Hz~500Hz, 最も知覚する周波数は 5Hz である。ルフイニ小体は、解明されていない点が多いが、皮膚の伸びに反応することがわかっている。またパチニ小体は、周波数領域は 5Hz~1000Hz, 最も知覚する周波数は 200Hz であり、主に振動に対して応答する [20]。また Johansson らはヒトが物体をつまみ移動する動作において、どの機械受容器が反応するかについても調べられている。把持動作においては、4つの触覚受容器が反応することで、把持している動作に関わる情報を知覚している。

Afferent type	SA1	RA	PC	SA2
Receptor	Merkel	Meissner	Pacinian	Ruffini
Location	Tip of epidermal sweat ridges	Dermal papillae (close to skin surface)	Dermis and deeper tissues	Dermis
Axon diameter	7–11 μm	6–12 μm	6–12 μm	6–12 μm
Conduction velocity	40–65 m/s	35–70 m/s	35–70 m/s	35–70 m/s
Sensory function	Form and texture perception	Motion detection, grip control	Perception of distant events through transmitted vibrations, tool use	Tangential force, hand shape, motion direction
Effective stimulus	Edges, points, corners, curvature	Skin motion	Vibration	Skin stretch
Response to sustained indentation	Sustained with slow adaptation	None	None	Sustained with slow adaptation
Frequency range	0–100 Hz	1–300 Hz	5–1000 Hz	0–? Hz
Peak sensitivity	5 Hz	50 Hz	200 Hz	0.5 Hz
Threshold for rapid indentation or vibration (best)	8 μm	2 μm	0.01 μm	40 μm
Threshold (mean)	30 μm	6 μm	0.08 μm	300 μm
Receptive field area (measured with rapid 0.5 mm indentation)	9 mm ²	22 mm ²	Entire finger or hand	60 mm ²
Innervation density (finger pad)	100/cm ²	150/cm ²	20/cm ²	10/cm ²
Spatial acuity	0.5 mm	3 mm	10+ mm	7+ mm

図 2.2: 各受容器別の知覚特性 [20]

2.1.3 受動触と能動触

触覚には、先ほど述べた皮膚に分布する受容器によって知覚する皮膚感覚と筋や腱の受容器によって知覚する深部感覚がある。皮膚感覚は、皮膚の需要菌興奮により、体のどの位置で刺激されたかを我々に知らせる働きをする。一方、深部感覚では頭や手首などの動きから、われわれに身体の姿勢に関する情報を知らせる働きをし、この二つの感覚が、相互的に作用することが知られている。そもそも”さわる”ことと”さわられる”ことの違いは、”さわる”ことの知覚体験は対象であり、”さわられる”ことの知覚体験は自己の身体だと言われている [19]。Gibson は、この”さわる”ことと”さわられる”ことを「外界から空間的情報を得るために、自分で外界を探索し、その感覚印象」を能動触、「身体の動きがない人間に環境内の物事が接触した時の印象」を受動触の 2 つに分類した [21]。ここでの大きな違いは、能動触の場合には、探索過程に身体の動きが生じることから、目的志向の面が強調される点である。

例えば、指で凸凹する面をさわると、その上をなぞった際に知覚するのは、振動

ではなくなぞった物体の表面の感覚になり、また同じ面を細い棒の先端で探索しても、同様に物体の表面を感じる事ができる。粘度のある液体を棒でかき混ぜた際には、肘や手首の運動、筋肉の伸縮を知覚するのではなく、流体の粘り気が感じられる。一方、他人に身体を触られている時、例えばマッサージを受けているとき感じられるのは、触れられている指の質感ではなく、身体のどの位置や押されている強さが感じられる。この2つの違いが受動触と能動触に関係するものである。

2.1.4 運動に関する錯覚

視覚や聴覚で見られる錯覚と同様に、触覚においても錯覚が見られることがわかっていて、特に触覚の空間性に関わる現象が多く見られる。本節ではファントムセンセーション、跳躍現象、仮現運動の3つの現象 [19] について述べる。

ファントムセンセーション

ある距離を隔てて皮膚上に二つの振動刺激を、同時あるいは短い時間間隔でほぼ同等の強度で与えた際に、二点の刺激として感じられず、その中間地点に一つの触振動感覚として知覚される [19]。二つの刺激の強度差、あるいは時間差によって生じる触感覚定位の変位現象はファントムセンセーションと呼ばれている。触覚において、異なる位置に置かれた二刺激の融合刺激感が失われ、二刺激として感じられる最小時間間隔は 4-6ms、または 8-10ms である。

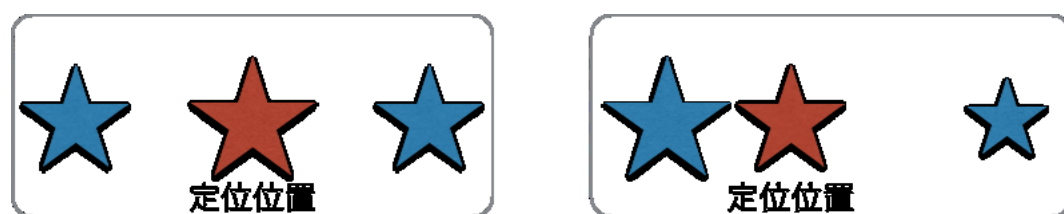


図 2.3: ファントムセンセーションの例

跳躍現象

ファントムセンセーションのように触刺激の位置の変位現象に跳躍現象がある [19] [22]. これは機械的, あるいは電氣的刺激パルスを皮膚に与えた時, 第2の触覚刺激パルスが時間的にも空間的にも接近して与えられると, 第一刺激の触覚位置が第二の触覚方向へ変異して感じられる現象である.

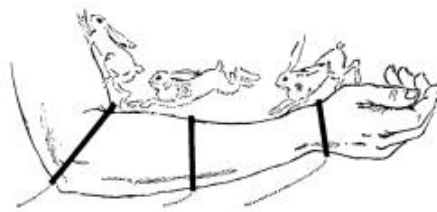


図 2.4: 跳躍現象 [22]

仮現運動

ファントムセンセーション, 跳躍現象では間隔的な刺激による空間性の変位であった. 仮現運動では連続的な刺激での触刺激の位置の変位現象である [19]. この仮現運動に影響を与える刺激変数として, 振動周波数・刺激強度・提示時間・提示時間間隔・刺激感距離などが考えられる. これらの中で最も重要な変数は提示時間と提示時間間隔であることが知られている.

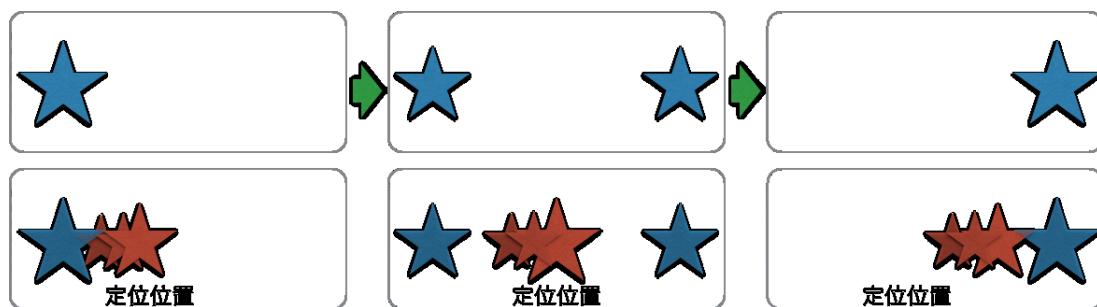


図 2.5: 連続的な刺激での触刺激の位置の変位現象

2.2. 従来の触覚再現手法

2.2.1 物理シミュレータを用いた触感の再現

物理シミュレータを用いた触感レンダリングに関する研究は古くから数多く行われている。物理演算を用いた触覚提示の研究として、長谷川らによる SPIDAR[図 2.6]での触覚・力覚の提示 [23]，手術シミュレータにおける臓器の力覚の提示を実現するために、部位ごとの力覚情報を予め記録しておき、接触部位に応じて再現する手法が取られている [24]。須佐らの触覚レンダリング [18] では、計算量を分散させるためのマルチレートシステム、力覚ポイント自身の慣性が含まれない 6 自由度力覚提示を実現するために触覚レンダリングに必要な情報を平面と接触点群で表される中間表現としてまとめることで、物体の硬さや摩擦感を再現を実現している。また竹花らによる数値解析による触覚レンダリング [25] では、FEM を用いた固体伝搬振動を再現し、力覚に提示に合わせて振動覚に向けた触覚の再現を実現している [図 2.7]。

このように、これら物理シミュレータを用いた触覚レンダリングでは、バーチャル空間を再現することで、自由度の高い触感の再現が可能である。ただし触感の再現するためには、触覚生成における専門的知識と複雑な計算を必要とし、物理パラメータの測定などの時間的コストを要求するものとなっている。



図 2.6: 触覚ディスプレイ：SPIDAR [23]

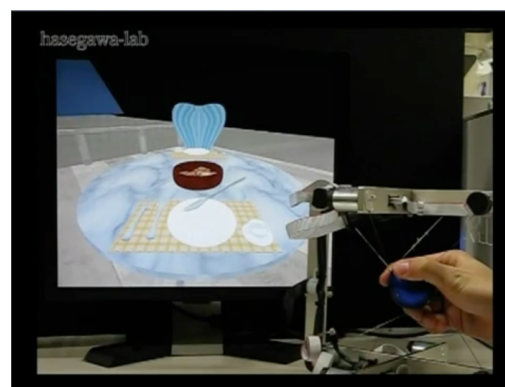


図 2.7: 須佐らの硬さや摩擦感のレンダリング [18]

2.2.2 触感のモデル化による触感の再現

物理シミュレータを使用せず、提示環境を限定し、ある物体での触感のモデル化を行なうことで、複雑な計算を使用せず触感を再現している手法を紹介する。限定した触感提示の環境下での、いくつかのパターンの触感に対応した研究が行われているものである。Yao らの An experiment on length perception with a virtual rolling stone [26] では、筒内部に入っているヴァーチャルな石が中を転がる際の接触をモデル化し、筒の傾斜角度に応じた石の転がる感じを再現している [図 2.8]。また Kuchenbecker ら [27] は、力、なぞり速度、振動の学習に基づきユーザのなぞり動作に応じたペンのなぞり感の再現を行なっている [図 2.9]。この研究では、ペンのなぞり感のモデル化によって、あるひとつのペンのなぞり感ではなく数種類の面をなぞった感じを再現するを実現している。また池野らの徳利のトクトク感の再現の研究 [28] では、徳利特有の振動を解析し、第二主成分までを抽出、モデル化することによる徳利の傾け角度に応じた徳利で注ぐとくとく感を再現している [図 2.10]

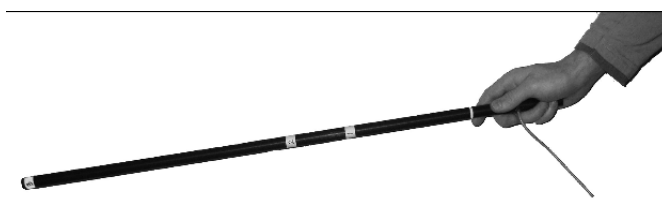


図 2.8: Yao らの筒を転がる感じの再現 [26]

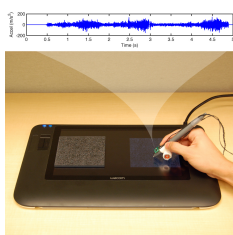


図 2.9: Kuchenbecker らの Haptography [27]

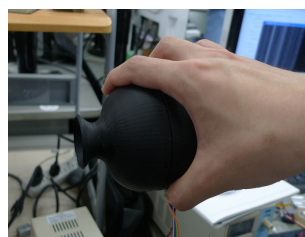


図 2.10: 徳利のとくとく感の再現 [28]

2.2.3 触感の記録による触感の再現

先ほど紹介した物理シミュレータやモデル化を行わず、一度記録した時の触感の再現のみ可能な手法がある。南澤らによって提案された触感を音響信号を用いて記録・提示する [29] ものである(図 2.11)。この手法では、計算もモデル化も行わないが、音響振動フォーマットを利用するため、広域の周波数を確保することが保証されている。しかし、触感を提示する物体を限定せず、振動子を貼り付けるだけで触感を付与することが可能であるが、コップに入れた材質感を提示するときは、コップに振動子を貼り付ける必要があり、触感の再現は一对一の状況下のみに限定されるため、リアルタイムでの記録・伝送が必要となる。



図 2.11: TECHTILE toolkit [29]

2.2.4 触覚を伴うコンテンツ生成に着目した研究

触感の再現だけでなく、触感を扱うコンテンツ生成に着目した研究が幾つか行われてきた。ここでは、その研究がどのような体験に着目しているか紹介する。下記に示す研究の着目点に「新しい触感を創ること」が上げられる。さらにユーザの触感を創る方法には、Colorful touch Palette では”混ぜ合わせる”というメタファを Haptic Editor では実物体のテクスチャを”なぞってコピーする”という、特別な技術や方法を要求してない。コンテンツ制作においては、このように特別な技術や方法を必要とせず、触感を創る方法を提案する必要がある。

Colorful touch Palette

Colorful touch Palette [30] では、「見たままに」テクスチャに触れる体験コンセプトに 10-80Hz の刺激パターン表面の材質感を電気触覚ディスプレイを用いて表現している [図 2.12]. 単一の刺激だけでなく異なるテクスチャを混ぜ合わせ、新しいテクスチャ感を作り出す触感の創造も実現している [図 2.13].

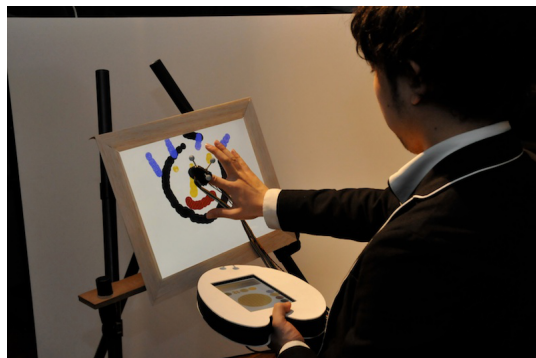


図 2.12: Colorful touch Palette [30]

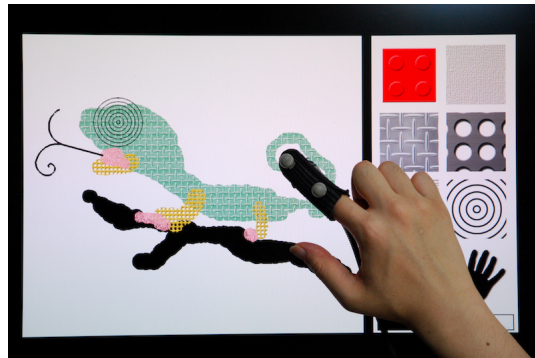


図 2.13: 数種類のテクスチャパターン [30]

Haptic Editor

Haptic Editor [31] では、音響信号を用いた触覚の記録の手法を利用し、実物体のテクスチャ感をコピーし 3D モデルにペースト（貼り付ける）体験をコンセプトに、触れる 3D モデリングツールを実現した [図 2.14]. テクスチャ感を再現するデバイスをペンに限定し、ペンで記録した触感を再現する手法である. 3D モデルに実物体のテクスチャを貼り付けるだけでなく、3D モデルに実際にペンで触れる体験を実現している [図 2.15].

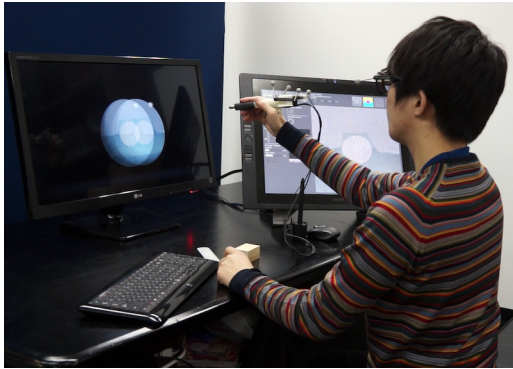


図 2.14: Haptic Editor [31]



図 2.15: なぞりによるテクスチャ感のコピー [31]

2.3. 本章のまとめ

本章では触覚における知覚原理と機械受容器毎の知覚特性，移動間に係る触錯覚と従来の触覚の生成手法と最後にコンテンツ制作に注目した研究を紹介してきた。触覚における知覚原理から，機械受容器別の知覚領域の違いと触知覚における身体運動の重要性，また空間性に関わる触知覚の重要性について指摘した。触覚生成手法については，物理シミュレータを用いた計算による生成手法と触感の再現環境を限定し計算コストを抑えてモデル化することによる触感の再現手法，計算を全く行わず触感を音響信号を用いて記録することによる触感の記録手法について紹介した。またコンテンツ制作に着目した2つの研究から，触感を伴うコンテンツの実現において，触感を創る上でユーザには特別な知識や技術を必要としないことの重要性について指摘した。このように，ある限定した環境下でのコンテンツ制作に向けた研究が取り組まれているものの，現在の視聴覚コンテンツのようにユーザがコンテンツを創る環境は実現していない。そこで，本論文では，触感を伴うコンテンツ制作の実現に向けて，従来の触感再現手法で要求される計算コストを抑え，且つ触感の再現環境を限定せず，触感を再現できる手法の提案する。

第3章

コンテンツ創造に向けた触感の再現手法の提案

本章では、提案する触覚を伴うコンテンツ創造のための触感の再現手法の概要とその要件を述べ、要件を満たすための実装手法の設計を行う。前章で紹介した触感レンダリングと触感を伴うコンテンツに向けた研究を踏まえると、触感を伴うコンテンツを創造するためのシステムの実現には、従来の触感再現手法で要求される計算コストを抑え、且つ触感の再現環境を限定せずに、触感を再現できる環境が必要になる。

その提案手法を設計するにあたり、下記の要件を満たす必要がある。

1. 触動作に応じた触感が得られること
2. 触感を変化させることが可能（選択した物体で触感が提示できること）

本論文では、これらの要件を満たす手法として、前章で紹介した音響信号を用いた触感の利用を基底とした、触感コンテンツ創造のための触感生成の手法を提案する。

3.1. 触感レンダリングの検討

3.1.1 固体伝搬する振動の再現に着目した触感レンダリングの検討

触感の再現の研究において、自由度の高い手法として物理シミュレータを用いた触感の再現手法が主流である。提示物体の物理パラメータさえ予め設定しておけば、どのような物体にも対応できる。ただし、kHz オーダーの触感を再現するには、高い計算能力と複雑な専用機器を必要とすることが問題となる。

一方、TECHTILE toolkit [29] で扱っている音響信号、言い換えると空気伝搬する振動を記録するフォーマットである。その空気伝搬する振動、音の再現することを目的としたサウンドレンダリングの研究では、高い計算能力を必要とするものの、提示機器は一般的なスピーカーであり、特殊な機器を必要としない。つまり、TECHTILE toolkit [29] で普段行なっている振動子による振動の提示と差異はなく、空気伝搬する振動を固体伝搬する振動として捉えることで、適応可能だと考えた。そこで、Doel らが行なったサウンドレンダリングの研究 [図 3.1] [32] [33] を参考に、固体伝搬する振動の生成を検討した。

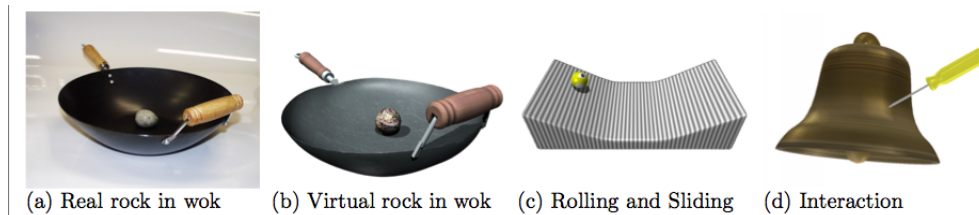


図 3.1: FoleyAutomatic [33]

Doel らは、まず音になるメカニズムを「衝撃→振動→振動の伝播（固体中）→波の伝搬（空気中）→聴覚」の 5 つの状態と捉えた [図 3.2]。このパイプラインから、「衝撃」部を物理シミュレーションで、「振動・波の発生・空気伝搬」部をサウンドシンセシスの手法で、「聴覚」を音響提示機器に、それぞれ割り振りサウンドレンダリングを実現している。

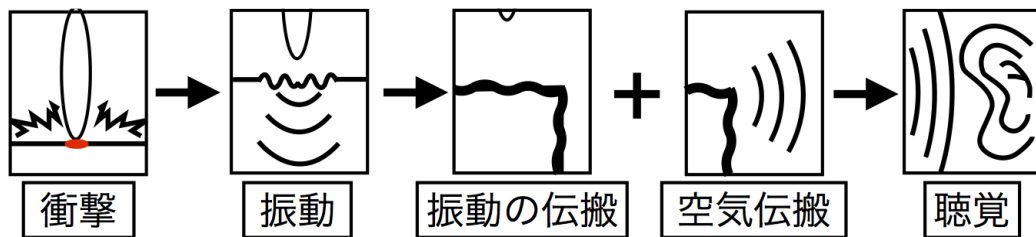


図 3.2: 音生成パイプライン

まず Doel らは物理シミュレーション下での剛体同士の接触について、剛体 1 の接触係数を $c:(s,t)$ 、剛体 2 の接触係数を $d:(u,v)$ 、 c と d の接触における回転角 ψ と定義し $q = (s, t, u, v, \psi)^T$ によって接触時の力積を計算している [32].

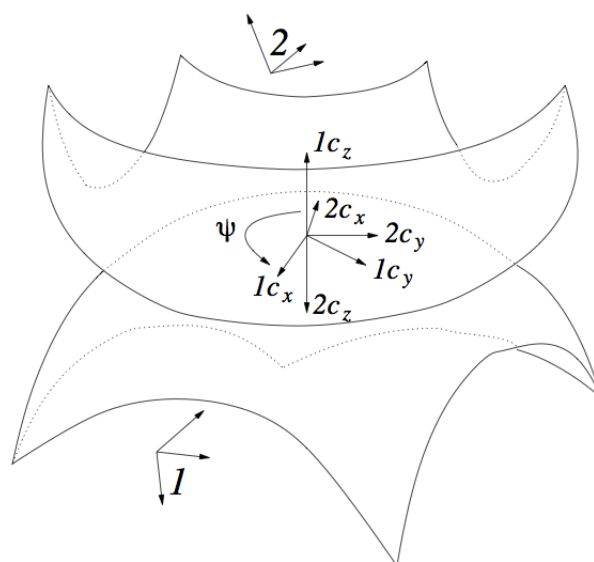


図 3.3: 接触時の剛体同士の接触に関わるパラメータ

さらに物体の形状によって力積は変化する。接触状態をさらに Slide と Rolling の 2 つに分類しそれぞれの状況に応じた力積を運動方程式から導いている [図 3.4], [図 3.5].

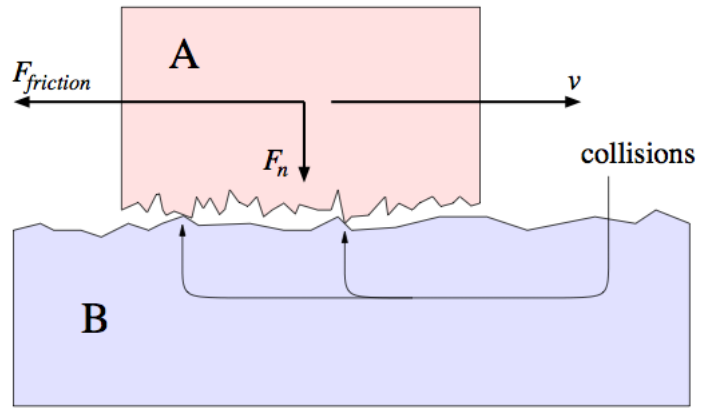


図 3.4: Slide に関わる運動力学方程式の図

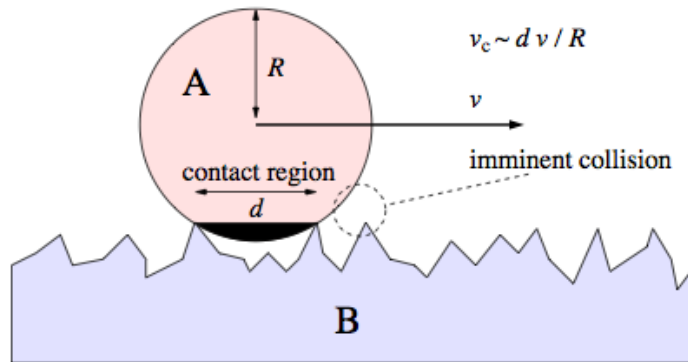


図 3.5: Rolling に関わる運動力学方程式の図

接触状況を細かく分類した後、シミュレーション内でレンダリングしたい原音を、予め音響解析を行い得られたモーダルモデルを用いてレンダリングしている。

$$y_k(t) = \sum_{n=1}^N a_{nk} e^{-d_n t} \sin(2\pi f_n t) \quad (3.1)$$

それぞれ、N：音響解析で得られた固有振動の数、f：固有振動の周波数、a：振幅、d：減衰係数、k：バーチャル空間内の接触位置、t：時間を表している。つまり物理シミュレータ部の撃力が、このモーダルモデルの振幅に関わっていることがわかる。このモーダルモデルは、その物体の基本周波数と減衰係数と関係付けられた減衰振動を表していることがわかる。つまり計算されるモーダルモデルの結果は、MP3 ファイルや WAV ファイルによって記録した音響データと同等の物を再現できる、聴覚知覚原理に基づき最適化された音響データとして扱っていることがわかる。この部分で示されることは、接触音のモデル化を行なっているということである。

触感レンダリングへの適応

この Doel らの音生成手法を、触覚の生成への適応を考える。Doel らの生成手法では大きく、1) 発生メカニズムの構造化 2) 発生に起因する部分の特定と計算部の役割 3) 計算部のアルゴリズムの決定 の3つに分類される。まず振動が発生するメカニズムは、ほぼ Doel らが提案したメカニズム構造から、空気伝搬する課程を取り除き、固体伝搬する振動だけを検討すれば良い。つまり基本的な枠組みは音生成のメカニズムから変更せず「衝撃」→「振動」→「振動の伝搬（固体中）」→「触感」と捉えることができる。図 3.6 から聴覚に関わる振動と触覚に関わる振動が、純粋に伝搬媒質の違いであり触覚に起因する振動とは、つまり聴覚にも関係性のあるものであることがわかる。

この図から「衝撃」部を物理シミュレーションで、具体的には力積を算出し、「振動・振動の伝搬」部で固体伝搬する振動の生成を行い「触感」をアクチュエータで再現すれば良いことがわかる。つまり振動を扱う触感レンダリングの設計要件は下記の4つになる。

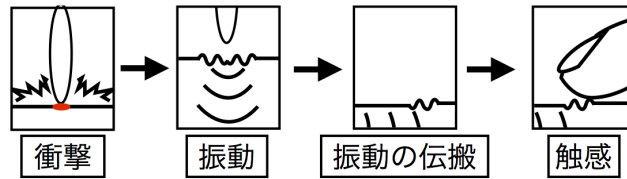


図 3.6: 固体伝搬振動の生成パイプライン

1. 力積を計算すること
2. 触感（振動）を再現すること
3. 時間性, 空間性を考慮した触感を提示すること
4. 生成した振動を提示すること

まず接触の際に関わる力積は, NVIDIA が提供している PhysX [34] やオープンソースライブラリである Bullet Physics [35], Unity [36] など物理エンジンを持っているシステムを選択するか, Doel らの研究でも用いられている力積の近似計算 (F:力積, t:時間, T:接触時間) できる [35].

$$I(t) = I_{max}(1 - \cos \frac{2\pi t}{T}) \quad (3.2)$$

生成手法の根幹をなす固体中を伝搬する振動の生成を実現するために, シミュレータを設計しサンプリングを検討した. Doel らの手法では音響解析と聴覚知覚原理に基づき, 音の主成分からサウンドシンセシスの手法に則った加算合成と減衰式と計算した力積を組み合わせることで音を再現している. ただし, 現在までに触知覚における, 音の主成分にあたるものが明確にはわかっていないため, 任意形状での振動を計算で求めることが難しい. そこで伝搬する物体の固有パラメータを設定することで振動を計算するシミュレータを検討した. このシミュレータに関しては次項で説明する. 3つ目の時間性・空間性はシミュレータ内のどの地点における振動を取得するかであるため, バーチャル空間での振動記録点をどこに設置するかを考える必要がある. また4つ目の生成した振動の提示は, ALPS 社製のフォースリアクターやスピーカー型の振動子を用いる.

3.1.2 FDTD 法を用いた振動伝搬シミュレータの検討

触感に関わる固有振動を求めなくとも、物体の固有パラメータを与えて物体を伝搬する振動の再現が可能ならば、現在、TECHTILE toolkit [29]で行なっている、物体 A（コップ）にマイクを貼り付け、物体 A'（別のコップ）に振動子を貼り付けることによる触感の伝送をバーチャルに再現することができる。そこで、固体伝搬する振動のレンダリングを実現するために、音響解析の研究で主に空気中の音圧変化のシミュレーションで使われる FDTD 法（時間領域有限差分法）を採用し、バーチャルな接触点から伝搬する振動の生成を検討した [37]。FDTD 法では、ある音場を格子状に離散化し、音圧と X 軸方向の粒子加速風土と Y 軸方向の粒子加速速度を取り出し、それぞれを配置した後、セル単位 [図 3.7] にまとめて計算しているものである。

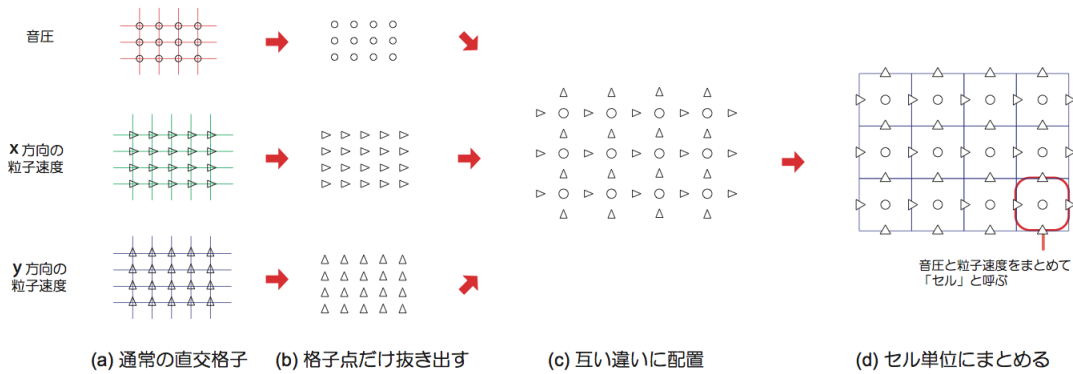


図 3.7: FDTD 法で扱われる 2 次元スタガード格子の空間方向の格子配置イメージ

気体、液体中での振動は、流体であるため縦波のみが伝搬する。しかし固体においては、密度の変化である縦波に加え形状変化である横波も伝搬する。音響解析で使われる FDTD 法では疎密波である縦波しか考慮していない。そこで形状変化成分を取り入れた固体伝搬に対応した FDTD 法を設計した [38] [39] [40] [41]。

固体伝搬する FDTD 法で扱う基本方程式は以下になる。

$$\frac{\partial}{\partial t} = [c] \cdot \nabla_s \dot{U} \quad (3.3)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \dot{U} = \nabla \cdot T \quad (3.4)$$

(3.3) はフックの法則であり, また (3.4) は運動方程式である. \dot{U} は粒子加速度ベクトル, T は応力ベクトル, ρ は密度, c はスチフネステンソルである. また $\nabla \cdot$, ∇_s は Auld の演算子と呼ばれており, $\nabla_s = \nabla \cdot_t$ の関係を満たすものである. この手法を用いて銅板とスチレンボードを伝搬する振動のシミュレーションを試みた.

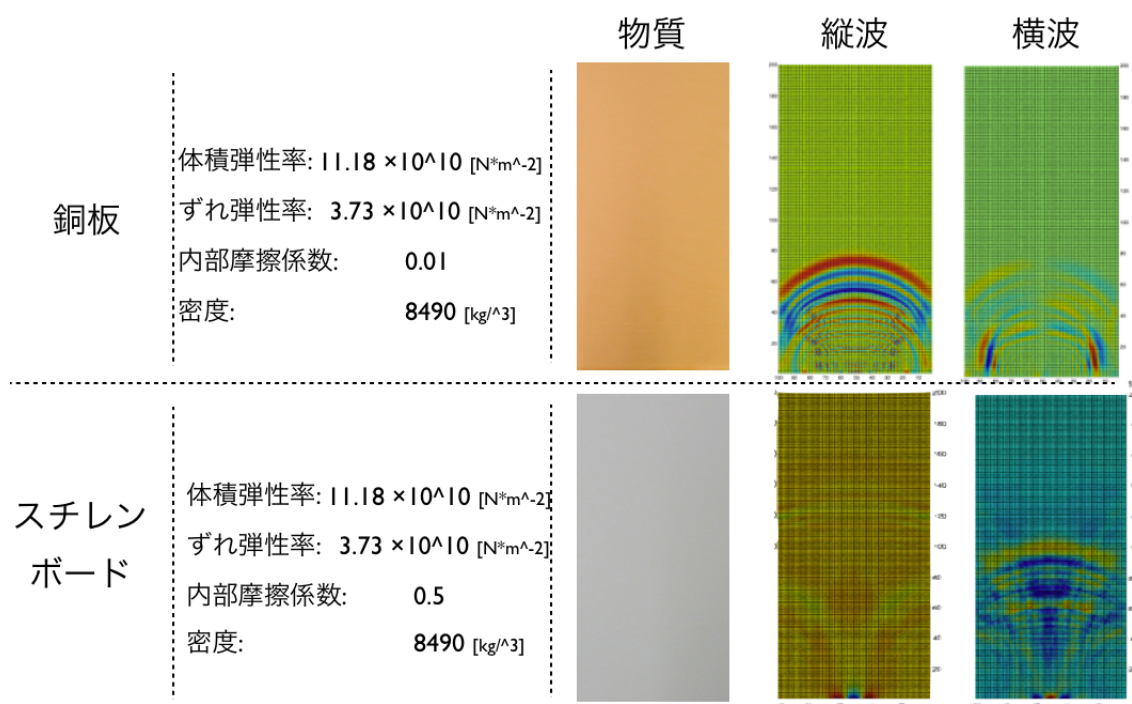


図 3.8: シミュレーション結果

FDTD 法を用いた振動伝搬シミュレータの結果

FDTD 法を用いた固体伝搬振動を計算を行ない, シミュレータないで計算した振動と実際の銅板とスチレンボードの振動を比較してみたが, 計算した振動は実際の振動を再現しているものではなかった [図 3.9]. またそれぞれの物体ごとの固有パラメータを解析する必要がある. 本シミュレータでの固有パラメータを決定する際, その材質に関わるものを調べることに時間がかかった. 加えて任意形状になった場合を想定すると実際のその物体のパラメータを測定する必要があり, 複

雑な形状での振動を実現するのは時間を要することがわかる。また今回のシミュレータでは振動伝搬側に対する振動の生成しか行なっていないが、ここで扱わなかった力積をかけた物体のパラメータも関わってくる。その2つの相互作用の結果として、把持している側の物体を伝搬する振動を考慮する必要がある。立ち返ってみるとサウンドレンダリングで行われている手法では、サウンドシンセサスの知見を応用して生成している。そもそも触覚知覚における振動成分が起因する要素が、聴覚知覚での基本周波数や倍音構造のように明確で無い事は先程も述べた。この複雑な触感情報の仕組みも踏まえ、伝搬側の振動の生成を検討するのではなく、力積をかける物体の方の操作に着目し、触感の生成を検討する。



図 3.9: 実際の銅板の触感とレンダリングした振動の比較

3.2. 触源のサンプリングとインパルス列の畳込みによる振動の再現

3.2.1 触源のサンプリングとインパルス列の計算

前項で物体固有のパラメータを設定し、固体伝搬する振動をレンダリングすることを検討したが、TECHTILEで提示できているクオリティでの触感の再現は現状では難しい。そこで力積がかかる物体に着目し、その触感を提示するだけでなく、触感を操作できる手法を検討する。触感は、振動を伝搬する側と力積がかかる物体との相互作用によって成り立っていることが、TECHTILE toolkit [29]で行なっているデモからもわかっている。例えば、同じコップであっても、ビー玉やスーパーボール、小石など入れる物体の材質や大きさによって変化する。入れるものによって変化する触感の再現と操作が可能か検討する。

Doelらのサウンドレンダリングで、生成される音は、モーダルモデルによって計算されたものだが、結局はmp3データやWAVファイルで記録した音響情報を再現している。つまり触感の生成において、解析は行わないものの一回の振動が記録されたデータは、このモーダルデータによって計算された音と同等のものであると仮定できる。次に振幅に関わる力積は、衝撃中のエネルギーの積分値であり

$$I = \int_0^T \mathbf{F} dt = m\mathbf{V}_T - m\mathbf{V}_0 \quad (3.5)$$

物体の接触時間： $0 < t < T$ 、質量： m 、速度： $\mathbf{V}_T, \mathbf{V}_0$ の運動方程式で表せる。この時の速度の変化は、物体と材質の跳ね返り係数 e に依存する。

$$e = \frac{|V'_1 - V'_2|}{|V_1 - V_2|} = -\frac{V'_1 - V'_2}{V_1 - V_2} \quad (3.6)$$

つまり、撃力がかかる物体の固有パラメータとして質量 m と弾性係数 e が触感を生成するパラメータとして有効であることがわかる。ここで表される撃力は一回の接触である。実際の接触、例えばスーパーボールを落とした場合、スーパーボールが生み出す触感は、一回の振動だけでなくスーパーボールが静止するまでに、接触によって発生した振動群であるから、実際には時間性を持った撃力の値を持ったインパルス列で表されることとなる。

そこで本論文では、一回の衝撃によって発生した振動を予め記録していたものを「サンプリング触源」、時間性を持った連続的なインパルス列を触感を再現するためのパラメータ「TactileForce」と定義する。もし入れる物体の触感を、インパルス応答と時間性を持った連続的なインパルス列を触感を再現するためのパラメータに分離することができれば、ビー玉の触感とスーパーボールのインパルス応答を合わせれば、実際には存在しない”スーパーボールのように跳ねるビー玉の触感”を合成することができる。

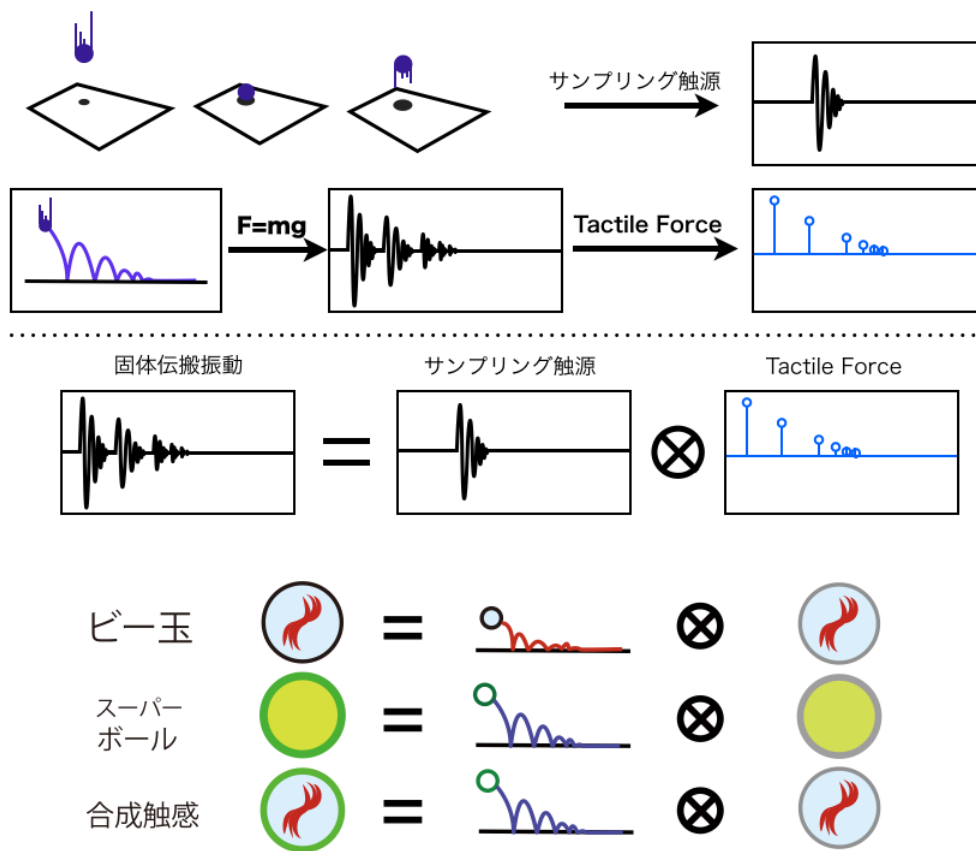


図 3.10: サンプリング触源と TactileForce による触感の再現

サンプリング触源と Tactile Force の畳み込みによる触感の合成

サンプリング触源と Tactile Force の畳み込みの手法を用いて、実際には存在しない触感の合成をロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 においてポスターとデモの展示を行なった [図 3.16]. ここでは、物理シミュレータを使用せず、サンプリングした触感の発音時間を検出する方法 [42] を用いて Tactile Force を抽出している. 図 3.12 は、図 3.13～図 3.15 のようにビニール製のボールを繋ぎ目のないボール紙でできた箱の上方 10cm の部分から落下させたときの波形である.

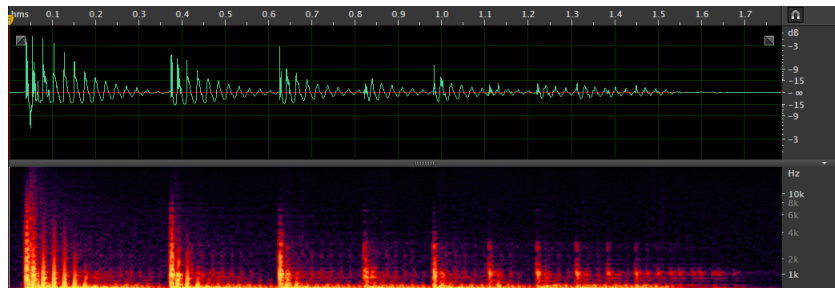


図 3.11: 周波数スペクトルグラム

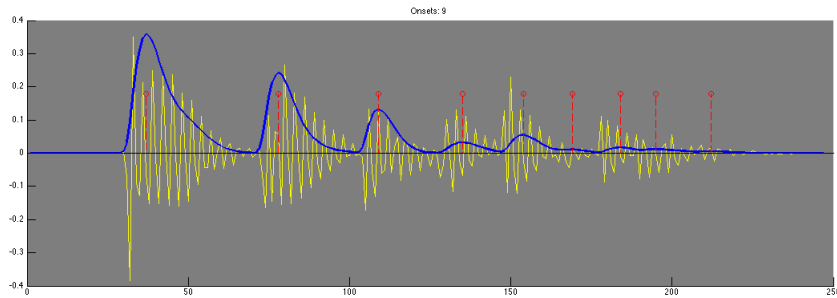


図 3.12: 音発時間検出を適応した結果 [42]



図 3.13: 記録例：ビニール球



図 3.14: 記録例：500 円玉

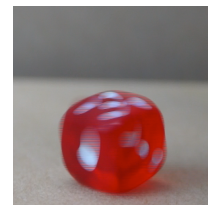


図 3.15: 記録例：サイコロ

このサンプリングした触感の発音時間を検出する手法で抽出した Tactile Force と別のサンプリング触源をあわせることによる触感の合成とは、物理シミュレータの計算によって擬似的に作成したものではないため、実際には感じたことのない物体の触感を体験していることになる。これは電子音楽が発達した後に登場した音の合成手法のひとつである、小さな音の粒を時間的・空間的にランダムに配置し、音を生成するグラニューラー合成のように、サンプリング触源と Tactile Force を合わせることによる新たな表現手法だと考えた。実際に、体験者からは多くのフィードバックを得ることができ、実在しない感覚ではあるが音と同じように表現の幅が広がりが見えるといった触覚のアート表現に繋がるものや、サンプリング触源を沢山用意していれば MIDI のように触感を作り出すことができるという話を貰った。しかし生成した振動だけでは、やはり振動を発生している物体を断定できないため、ディスプレイを設置して上から見ている状態を再現した方がいいという指摘を頂いたりもした。



図 3.16: ROBOMECHにて合成触感を体験する場面

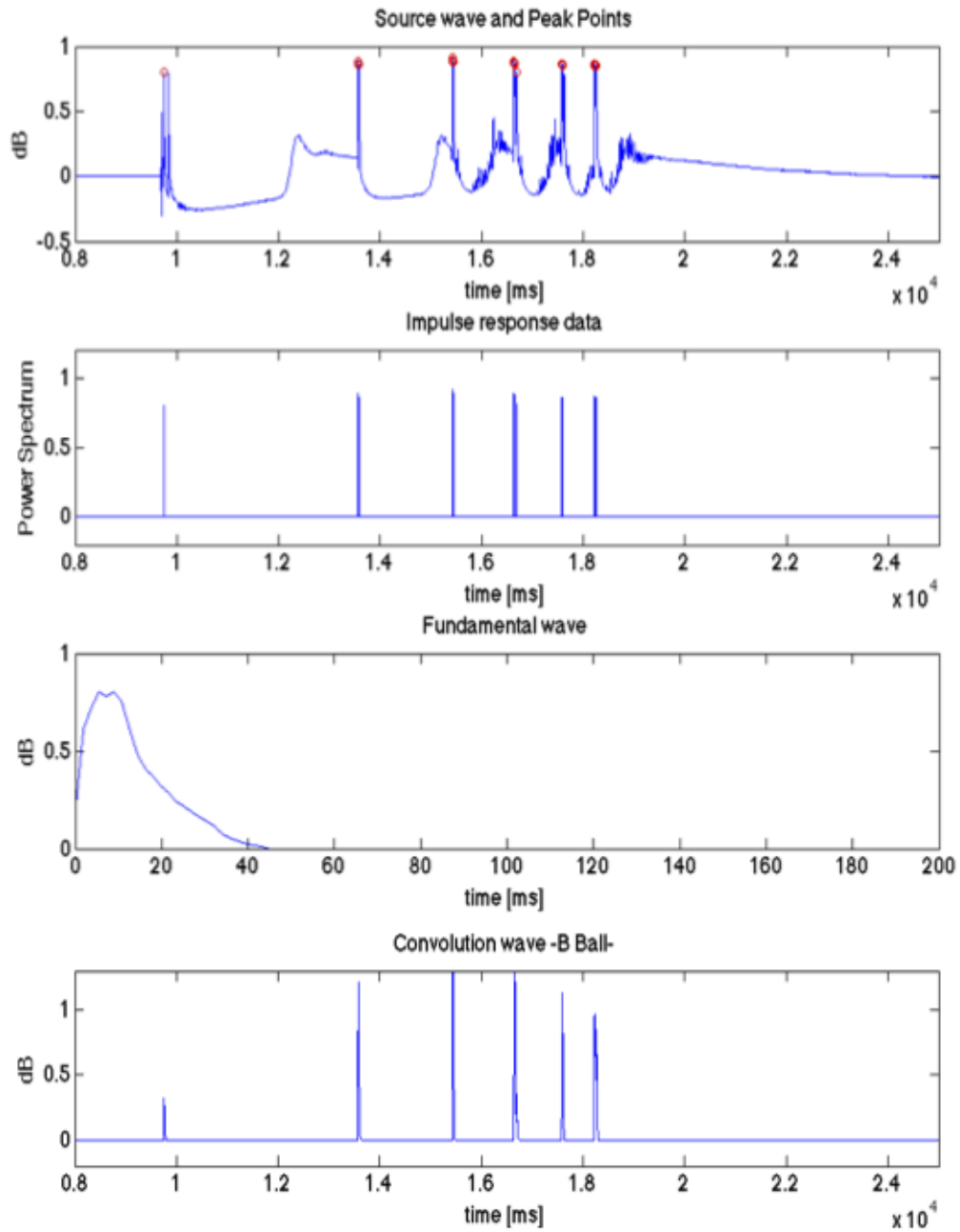


図 3.17: 記録した振動からインパルス列を抽出, サンプリング触源を畳み込んだ例

3.2.2 身体動作と連動した触感レンダリング

触覚知覚には能動触が重要であることが明らかになっている。2章でも述べたが、触覚には必ず身体動作が関わっており、本手法でも身体動作を取り入れる必要がある。そこで前節で提案した Tactile Force に身体動作を適応させる。サンプリング触源は物体を伝搬する振動情報であるためここでは関係なく、Tactile Force で表される y 軸成分、接触の力の大きさに関係する。例えば把持している物体の中に、別の物体が入っている状況を想定したとする。この際に把持物体を左右に振った場合、中に入っている物体にかかる加速度は、手首が右から左に移動している場合、手首とは逆ベクトル（左から右）の慣性力が働くが、手首が静止した際、慣性力はなくなり、最終的には加速度は右から左へ向かう方向ベクトルに変化する。つまり、Tactile Force の生成に関わる運動方程式に加えて手首の身体動作に伴う $F = ma$ を考慮することで、身体動作を取り入れた触感を再現が可能である [図 3.18].

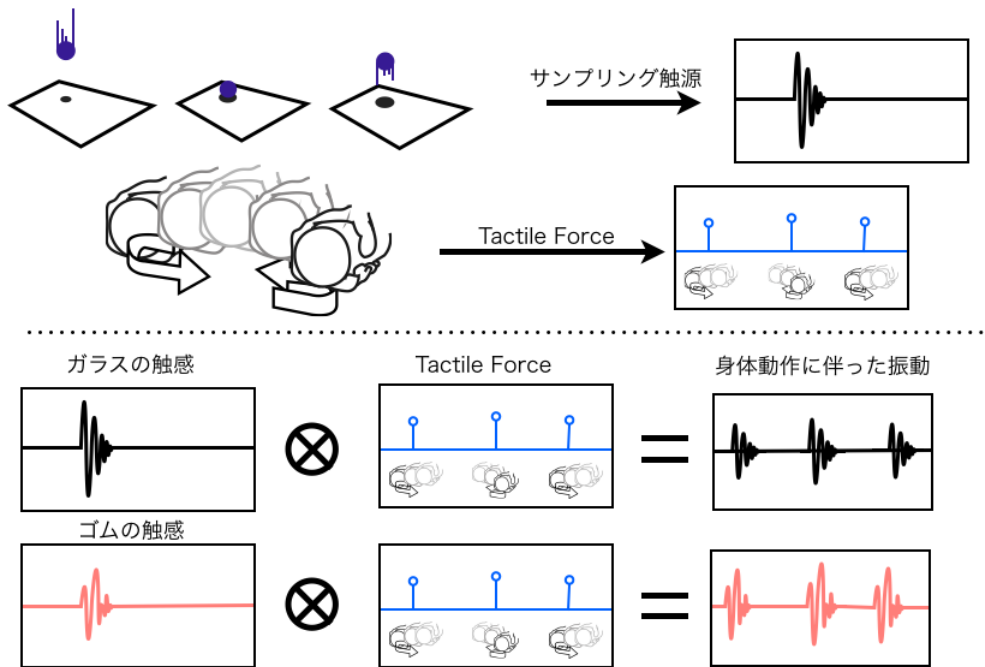


図 3.18: 身体動作を考慮した TactileForce とサンプリング触源の畳込みの例

3.3. 触源のサンプリングからコンテンツ制作までの過程

3.3.1 触感のサンプリング

音響コンテンツの現場において、音の素材を採集することは必要不可欠である。特に効果音はたくさんの音の素材をサウンドデザイナーが足を運び、録音し、これらの一つ一つ映像に合わせていく。例えば、映画 STARWARS [43] のレーザー銃の音は電線をレンチで叩いた時の音を使用し、ゲーム制作においても、クジラの泳ぐ音などは、実際にプールで水中マイクを用いて記録している [図 3.20]。このように音の記録において、いくつかの録音機器を用いて、その場面にあった音を録音している。触感の記録においても同じことがいえ、通常のマイクだと水に浸ければ壊れてしまうように、録音対象にあったマイクを検討しなくてはならない。



図 3.19: 録音例：STARWARS [43] のビームの音 図 3.20: アサシンクリード 4 [44] の作中でのクジラが出てくる場面に使われた音の記録方法

3.3.2 コンテンツ制作と触体験までの過程

3.2で提案した「サンプリング触源」と「Tactile Force」を用いて触感を生成するためには、サンプリング触源を作ることが最も重要なこととなる。効果音の録音も同じことが言え、現実に存在しない音、例えばスターウォーズのレーザー銃の音などを、創造した上で探す必要があり、またクジラが飛び出てきた音に似た音を記録する場合でも、どのようやって記録すればいいか、工夫する必要がある。さらに、想定できる触感を録音し終わった後には、どうやってその触感を提示するかも考える必要がある。TECHTILE toolkit のデモでわかっていることは、基本的には

マイク側の物体と振動子側の物体は同じである必要があり、その関係性が崩れると触感ではなくなることがほとんどである。そのため「触っていたくなる」触感を作るためには、どのような提示方法で、且つどのような身体動作を促すかを考える必要がある。ペンならなぞる、徳利なら注ぐといったように形状から動作が、想像できるものであることが、ひとつの解ではないかと考えている。

私が触感を扱うコンテンツを作るための手法を検討するにあたり、サウンドデザイナーならぬ触感デザイナーがコンテンツを作るまでの過程をまとめると下記のようにになると考える。

1. 触感を採集する
2. コンテンツにあった触源セットを作る
3. 提示物体の選択, または設計
4. 身体動作の適応
5. シミュレータ環境の構築

次章では、この流れに沿って実装を行なっていく。

第4章

提案手法の実装

実際に提案した手法を用いて触感を生成するためには、1) 触感を採集する 2) コンテンツにあった触源セットを作る 3) 提示物体の選択, または設計 4) 身体動作の適応 5) シミュレータ環境の構築の5つの段階を踏む必要がある。本章ではこの制作フローに沿って実装を行なっていく。

4.1. 触源の記録・セットの作製

4.1.1 触録環境・機器

これまでに幾つかの方法で触感の記録を行なってきた。これまでに使ってきたマイクを紹介する。

1. オーディオマイクによる触感の記録
2. コンタクトマイクによる触感の記録
3. プリモ社 低周波マイク (EM156S5A) [45] による触感の記録

それぞれのマイクを補足しておく。(1)のマイクは普段 TECHTILE toolkit でも扱っているマイクである。皿やワイングラスなどのガラス材を割れた触感を録触する際に用いて、記録した触感は、地面にたたきつけた触感として使用した。この時の触感は、ガラスの粉碎感と割れたとの破片感の触源として使用した。(2)のコンタクトマイクは、壁を伝搬する振動を記録するものであるため、(1)で紹介したオーディオマイクよりは固体伝搬振動を記録することができる。(3)の低周波マイク



(1) オーディオマイク



(2) コンタクトマイク



(3) 低周波マイク [45]

図 4.1: マイクの種類

クは (2) のコンタクトマイクで記録した触感と比較し空気伝搬する振動を記録しないため、クリアな固体伝搬する振動を記録できる。次項で説明する触源セットの記録は、この低周波マイクを用いて記録した。

またオーディオインタフェースには Roland の DUO-CAPTURE EX [46] と audio-technica のマイクアンプ AT-MA2 [47] を用いて記録し、Adobe Audition で記録した触感ファイルを編集している。記録フォーマットは wav ファイルで、サンプリング・レート 48000Hz、ビットデプス 32bit (浮動小数)、I/O バッファサイズ 2048 サンプルで保存している。



図 4.2: Roland DUO-CAPTURE EX と audio-technica マイクアンプ AT-MA2

4.1.2 触源セット

ここでは、実際に(3)の低周波マイクと Roland の DUO-CAPTURE EX と audio-technica のマイクアンプ AT-MA2, Adobe Audition を使用して、触源セットを作成した。その際の構成 [図 4.3] と記録した触源を紹介する。今回、サンプリング触源に使用するための環境として、3mm のアクリル板と 2mm の木板に落とした際の触感を記録した。この 2 種類の素材の違いは、素材の跳ね方に関わり、例えば同じスーパーボールの触感で 2 つの触源を比較してみると、アクリルの方が弾んだ触感が得られ、また木板では少しくぐもった触感として違いが感じられた。落とす素材は、ビー玉 (20mm 30mm 50mm) , スーパーボール (20mm 30mm 50mm) , 木製の球, ステンレス製の球, コルク製の球, ピンポン球, スポンジ玉, テニスボール, ビニール製の球 (橙, 緑) である [図 4.3]. 高さ 100mm 地点から落下させた [図 4.4] 際の触感を記録した [図 4.6]. 例えば、弾む球体のスーパーボールとピンポン球の触感を比較してみると、スーパーボールはボウンボウンとゴムっぽい感じが乗ったものになり、ピンポン球では柔らかさのないシャープな触感が得られる。ステンレス製の球とスポンジ玉を比較すると、ステンレス製の球では高周波も乗っているため、ガチンという音と共に硬く瞬間的な触感が得られ、一方スポンジ玉ではスーパーボールほどゴムのような弾力がない柔らかさが感じられた。これらの記録した触感を触源セットとして使用し実装を行なった。

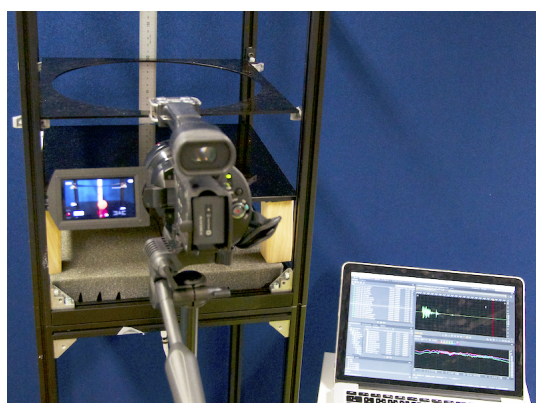


図 4.3: 記録装置, 記録用のカメラ



図 4.4: 今回使用した素材



図 4.5: 素材の落とす前の風景

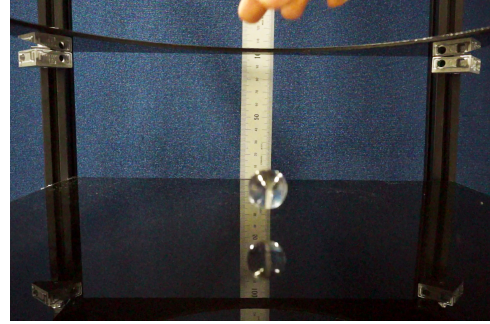


図 4.6: アクリル板にビー玉を落下させる風景

アクリル	ビー玉 20mm	アクリル	ステンレス製の球	木板	ビー玉 20mm	木板	ステンレス製の球
アクリル	ビー玉 30mm	アクリル	コルク製の球	木板	ビー玉 30mm	木板	コルク製の球
アクリル	ビー玉 50mm	アクリル	ピンポン球	木板	ビー玉 50mm	木板	ピンポン球
アクリル	スーパーボール 20mm	アクリル	スポンジ玉	木板	スーパーボール 20mm	木板	スポンジ玉
アクリル	スーパーボール 30mm	アクリル	テニスボール	木板	スーパーボール 30mm	木板	テニスボール
アクリル	スーパーボール 50mm	アクリル	ビニール製の球 橙	木板	スーパーボール 50mm	木板	ビニール製の球 橙
アクリル	木製の球	アクリル	ビニール製の球 緑	木板	木製の球	木板	ビニール製の球 緑

図 4.7: 触源セット

4.2. 触感レンダリング

今回開発環境に音響信号を操作するにあたりオーディオデータやイメージデータを処理するビジュアルプログラミング言語として使われている MAX/MSP [48] を選択した. 今回の設計したシミュレータのフローチャートを図 4.8 に示す.

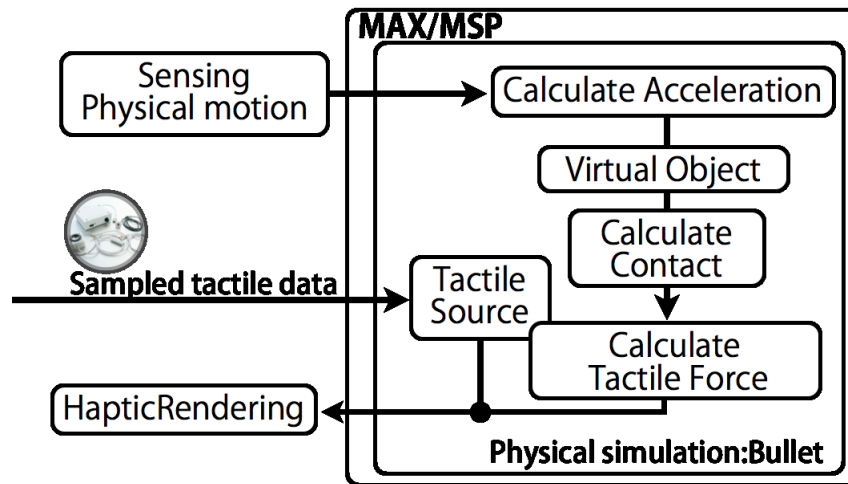


図 4.8: 触感レンダリングのフローチャート

Tactile Force は MAX/MSP には, オープンソース物理シミュレータ Bullet Physics が実装されているため, 本論文ではこのシミュレータを用いて設計を行なう. さらに身体動作に関わる加速度は 3 軸加速度センサ AS-3ACC-34.9 を使用し Arduino [49] でシリアル通信を用いて MAX/MSP へ送信する.

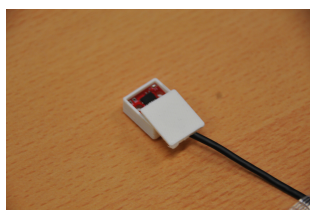


図 4.9: 3 軸加速度センサ AS-3ACC-3

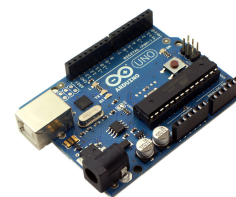


図 4.10: Arduino

シミュレータ部を図 4.11 に示す MAX パッチで実装し, 身体動作に関わる加速度

を通信するシリアル通信部の MAX パッチを図 4.12 に、Contact Force から Tactile Force を計算し触覚をレンダリングする触覚レンダリング部を図 4.13 に示す。

ここでシミュレータ環境に MAX/MSP を用いた理由も含まれるが、既に MAX/MSP で実装されている Bullet のパッチを用いることで、ユーザは任意のモデルをバーチャルワールド内に設計することができる。モデルは複数個設置することが可能である。その際には図 4.11 の gridshape を複数配置するだけで実装できる。また身体動作に連動させて動かすモデルは、シリアル通信部から一本パッチコードで結ぶだけで良いため、シミュレータの設計において、MAX/MSP をある程度操作したことのあるユーザであれば、従来プログラミング言語の手続きよりも容易に設計できる。また把持物体とは別に接触物体の設定を行なう際も、基本的には先ほどの同様の手続きを踏むだけで良い。ただし触覚を忠実に再現する条件としてバーチャル空間は把持物体と同環境を設計する必要がある。

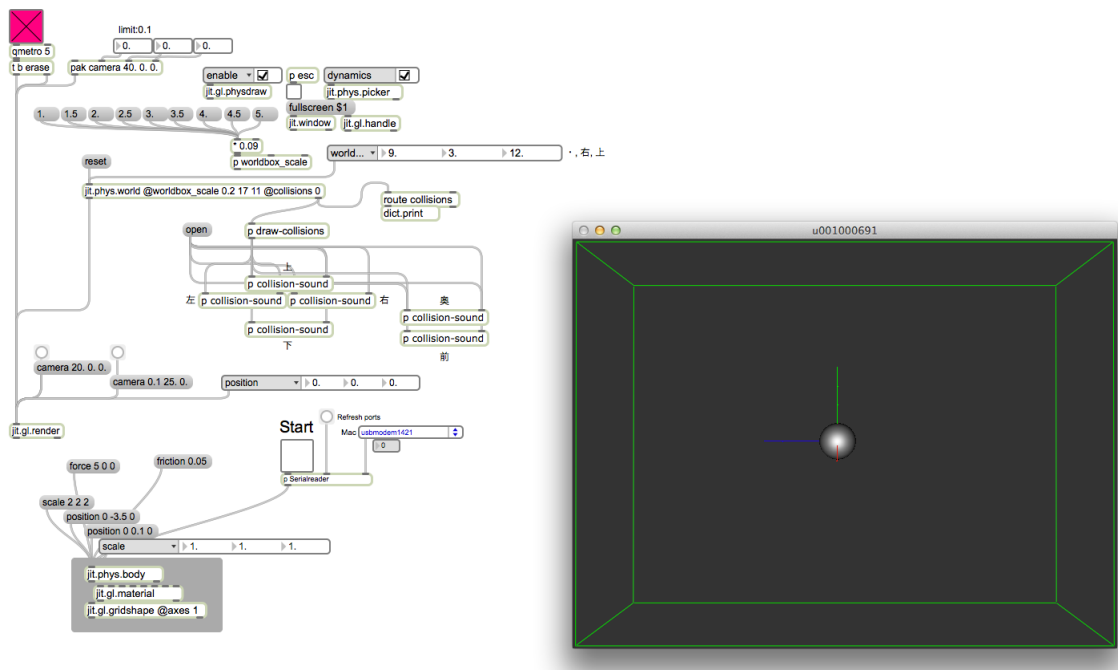


図 4.11: シミュレータ部

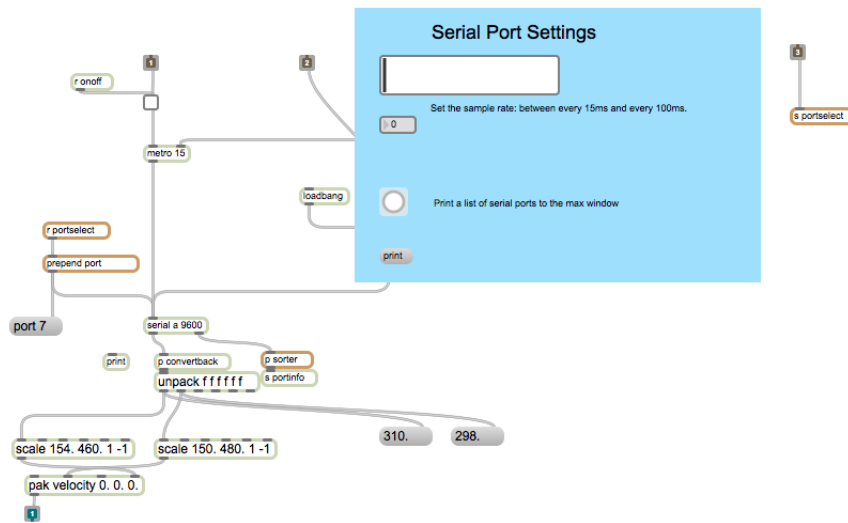


図 4.12: シリアル通信部：青い枠内はシリアルポート設定ウィンドウ

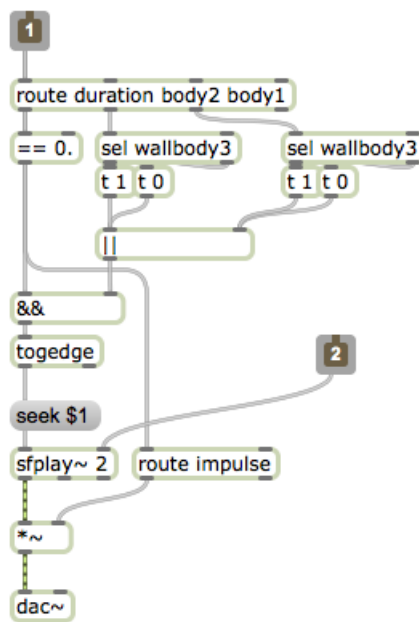


図 4.13: Tactile Force 部

4.3. デバイスの試作

4.3.1 1st プロトタイプ

最初に身体動作と連動して触感を提示するプロトタイプとして、図4.14のような片手で把持できる提示デバイスを設計した。ここでは、ディスプレイに表示されている視覚情報に左右されない、純粹な触感情報の提示だけに注目し、例えば箱の中身がわからない時に箱を振ってどんなものが入っているか調べる触体験を想定したものである [図4.15]。このデバイスでは、左右にスピーカー型の振動子を設置することで、親指と人差指の間での空間性を持たせている。Microsoft KINECT [16] を用いてユーザの手を振る動作を取得し Tactile Force を計算した。このデバイスでの触感の提示を、VRSJ2013 (大阪) でデモ展示を行い、その際に得られたフィードバックとして、振動子がひとつであっても左右感が出せるか、箱の中身だけでなく外側に出せないか、といった触感の空間性に関する話を頂き、一方で、触感を使ったコンテンツを創るためのエディタには何が必要なのかという議論を行なった。

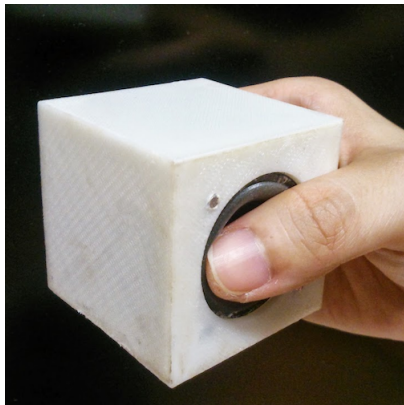


図 4.14: 提示物体：箱 片手タイプ



図 4.15: 箱を振る体験者

4.3.2 2st プロトタイプ

1st プロトタイプのフィードバックを受け、2つ目の身体動作と連動して触感を提示するプロトタイプとして、ひとつの振動子と加速度センサを組み合わせたプロトタイプを設計した [図 4.16]。図 4.17 のように両手で透明の箱を把持し、内部の状況が透けて見える状態で、物体が壁に衝突する際の触体験 [図 4.18] を提示している。ここでも 1st プロトタイプと同様に、視覚情報に左右されない、純粋な触感情報の提示を目的とし、透明な箱を提示物体として用いることにした。さらにこのプロトタイプでは振動子をひとつにした場合、触感の空間性がどのように変化するかを確認することも含め、この設計で触覚講習会（2013, 東京大学）でデモ展示を行なった。ここでは触感コンテンツを想定した触感の伝送、触感の記録と提示と並べて、触感を身体運動に合わせた提示の手法として展示した。その際に参加されていた企業の方々からは、特にサンプリング触源の作成方法と、バーチャル空間の創造手法について聴かれることが多かった。このフィードバックから、現在触覚に興味を示している業界でネックになっている部分が、触感を取り入れる際にかかる時間的な面と技術的な面であることが見受けられる。また、今回ひとつの振動子で触感を提示したが、ひとつの振動子であっても傾けた側で物体が接触したように感じられることがわかった。これは箱を右に傾けた時には右側の壁に衝突し触感が得られるという、過去に経験した状況を学習しているからこそ、空間性の定位が見られたものと考えられる。



図 4.16: 提示物体：箱 両手タイプ



図 4.17: 箱を傾ける体験者

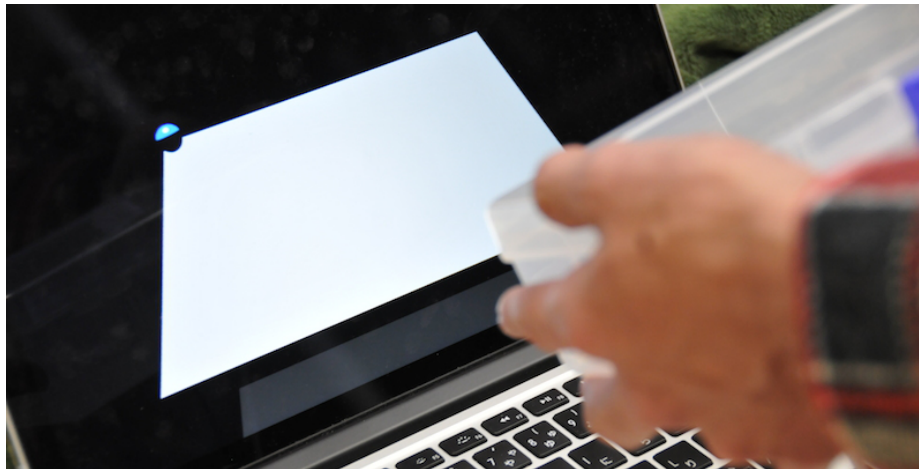


図 4.18: 透明の箱と同じ大きさのバーチャルな箱を設計

4.3.3 3st プロトタイプ

3つ目のプロトタイプでは、これは2nd プロトタイプで物理シミュレータの状況が見たいというフィードバックも踏まえて、コンテンツが画面でみえることを想定した両手把持型のディスプレイデバイスを設計した。大きさが縦 90mm x 横 160mm x 幅 30mm, ステレオスピーカーと、振動子を十字方向に設置し、上下左右の振動の提示を見込んだものである [図 4.19]。このデバイスでは、箱を上から眺めていることを想定し、シミュレータのバーチャルな箱を上から俯瞰した時の映像が見えるよう設計している。ここでは、触感位置を正しく定位させるために、デバイスの上下左右の位置に、振動子を設置したが、このデバイスでは、それぞれの振動がディスプレイを通して全体に伝搬してしまい、上下左右への触感の位置を綺麗に提示できない問題が見られた。さらに外装を粘土で設計しているため、振動子の位置が正確でない点と、上下に対応する振動子が、完全に手に当たらない点も、正しい触感の位置の定位が示せない理由と考えられる。

これらを踏まえて、このディスプレイ型デバイスの形状では、1.) 触感位置の定位を想定した振動子の位置の問題、2.) 振動がディスプレイを伝搬する問題、を改

善する必要がある。そこで、次のプロトタイプではこれらの問題を解決するための設計を行なうことにした。

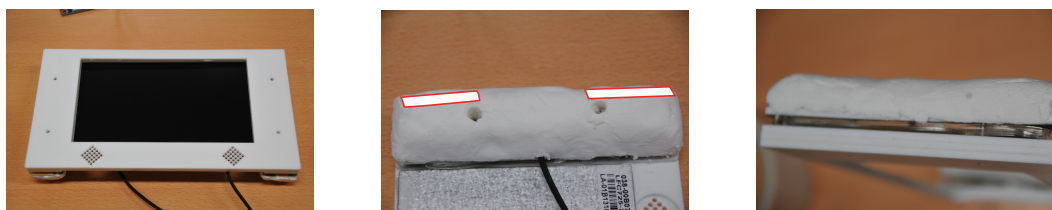


(1) 全体像 (2) 下部にスピーカー (3) 振動子を十字に設置

図 4.19: 3rd プロトタイプ 画面付き

4.3.4 4th プロトタイプ

3つめのプロトタイプで見られた1.) 触感位置の定位を想定した振動子の位置の問題, 2.) 振動がディスプレイを伝搬する問題, の2つの問題を解決するために, 4つめのプロトタイプでは, それらに対応した改善点を講じた [図 4.20].
今回は, 左右の把持する部分の上下に振動子を埋め込むことで, 3rd プロトタイプでは感じにくかった上下感を提示できるようにし, またディスプレイから左右に振動が混ざるのを軽減するために, 振動緩衝材を入れた設計になっている. 本デバイスの大きさは, 縦 125mm x 横 210mm x 幅 22mm に変更した. 3rd プロトタイプと同様, ステレオスピーカーと4つの振動子が入っている.



(1) 全体像 (2) 振動子を縦に2つ (3) 間に挟んだ振動吸収材

図 4.20: 4th プロトタイプ 画面付き

4.3.5 5th プロトタイプ

5つめのプロトタイプでは, さらに縦の振動子の分割し, より上下感を提示できる設計にした [図 4.21]. デバイスの大きさは, 4th プロトタイプと変わらず縦 125mm x 横 210mm x 幅 22mm で設計している. 試作コンテンツの設計はこのデバイスを用いて行った.



(1) 全体像



(2) 振動子を分離



(3) 3mm の隙間

図 4.21: 5th プロトタイプ 画面付き

4.4. 試作コンテンツ

最後に作成した触源セット・デバイス・シミュレータを組み合わせ、試作コンテンツを作成した。バーチャルな箱の中に球が入ったもの [図 4.22] になっており、デバイスを傾けて球をコロコロさせて壁にあたった時や球が弾んだ時にその弾みの触感が感じられる。コントロールパネル [図 4.23] では、Tactile Force の生成に関わるパラメータである赤色の枠の反発係数とオレンジの枠の質量をユーザが変化させることができ、また黄色の枠で囲まれたプルダウンメニュー [図 4.24] から、触源セットを選択することができるようになっており、ユーザは触源セットの中から好きな触感を選択して、バーチャルな球の触感を変えることができる [図 4.25, 図 4.26]。

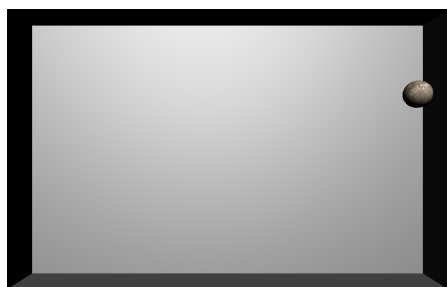


図 4.22: シミュレータ画面



図 4.23: コントロールパネル



図 4.24: コントロールパネル 触源セットの選択

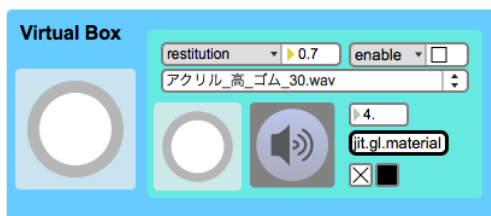


図 4.25: スーパーボールの触感 選択時

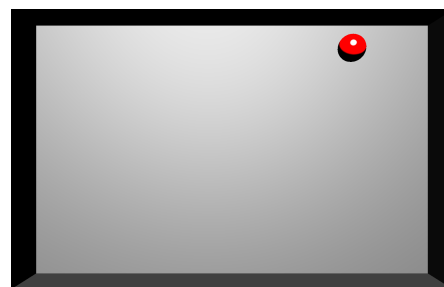


図 4.26: スーパーボール時のシミュレータ画面

第5章

検証実験

5.1. 合成の実験

本章では、第3章で必要条件として挙げた、1.) 触動作に応じた触感が得られること 2.) 触感を変化させることが可能（選択した物体で触感が提示できること）のうちの2.)にあたる部分が本論文で提案した手法で満たされているか、検証実験を行なった。具体的には、サンプリング触源とインパルス列の畳み込みによるレンダリングができていないかを検証するために、物理シミュレータのパラメータの変化によって触感の材質感の操作が可能かどうかについて、そして提示デバイスに関する触感の定位の実験を行なった。実験環境は図5.1に示すとおり、被験者は24歳の男性3人、全員イヤーマフを装着してもらい、肘を机の上に乗せて、試作デバイスを把持している状態で、それぞれ重さパラメータの変化、弾性係数の変化、恒常法による触感の解像度、触感定位位置の4つの実験を一度に行なった。



図 5.1: 実験環境

5.1.1 重さパラメータの変化による触感の変化

実験目的

物理シミュレータの重さに関わる関数を変化させることで、触感の材質感：重さ
が変化するか、上下法を用いて検討した。ここでは、質量パラメータの変化が、触
感の質量変化に対応しているかを確認する。

実験設定

標準刺激は 14g のスーパーボールを約 100mm から落下させた際に記録した触
感を提示し、比較刺激には 4g のスーパーボールを約 100mm から落下させた際の
サンプリング触感と物理シミュレータの質量パラメータを「4.0g, 5.4g, 6.8g, 8.2g,
9.7g, 11.1g, 12.5g, 13.9g, 15.3g, 16.7g, 18.1g, 19.6g」と $\sqrt{2}$ gの間隔で提示し、質感
に変化があった際の質量パラメータを記録する。被験者は、24 歳の男性 3 人で行
なった。この実験では全員イヤーマフを装着してもらい、音は聞こえない状態で、
且つ目を閉じた状態での手の感じる刺激の変化を回答してもらった。一回の試行
で、標準刺激と試行回数は上下合わせて 5 回ずつ、総試行回数 10 回行なった。

実験結果

実験の結果、被験者 A の場合、4.0 g から上げていった場合の平均が 15.6, 19.6g
から下げていった場合の平均が 12.8g であった。被験者 B の場合、4.0 g から上げ
ていった場合の平均が 13.3 であった。19.6g から下げていった場合の平均が 6.5g
であった。被験者 C の場合、4.0 g から上げていった場合の平均が 13.6 であった。
19.6g から下げていった場合の平均が 12.2g であった。また 3 人の平均から、4 g の
触感は 10.5g から 14.2g の範囲で、重さパラメータの変化させることによって、変
化が見られることがわかった。

5.1.2 弾性係数の変化による触感の変化

実験目的

物理シミュレータの弾性係数に関わる関数を変化させることで、触感の材質感：弾みが変わるか、上下法を用いて検討した。ここでは、弾性係数の変化が、触感の弾み感の変化に関わるか検討した。

実験設定

標準刺激は4gのスーパーボールを約100mmから落下させた際に跳ね返った最高点が約80mmの記録した触感を提示し、比較刺激には4gのスーパーボールを約100mmから落下させた際のサンプリング触感と物理シミュレータの弾性係数を「0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9」と0.1の間隔で提示し、質感に変化があった際の弾性係数の値を記録する。被験者は、24歳の男性3人で行なった。この実験では全員イヤーマフを装着してもらい、音は聞こえない状態で、且つ目を閉じた状態での手の感じる刺激の変化を回答してもらった。試行回数は上下合わせて5回ずつ、総試行回数10回行なった。

実験結果

実験の結果、被験者Aの場合、弾性係数を0.1から上げていった場合の平均が0.8、1.0から下げていった場合の平均が0.7gであった。被験者Bの場合、弾性係数を0.1から上げていった場合の平均が0.9、1.0から下げていった場合の平均が0.8gであった。被験者Cの場合、弾性係数を0.1から上げていった場合の平均が0.9、1.0から下げていった場合の平均が0.8gであった。また3人の平均は、0.9と0.7という結果が得られた。この結果から、0.7から0.9の範囲で、弾性係数を偏差させることで、標準刺激の弾性係数を超える触感ができることがわかる。

5.2. 空間性の実験

5.2.1 恒常法による触感の解像度の検証

実験目的

恒常法を用いて測定し、2度振動を提示し、横の解像度を調べる場合は「どちらがより右だったか」を答えてもらい、縦の解像度を調べる場合は、「どちらがより手前だったか」を答えてもらうことでヒトの無意識の知覚レベルで左右、または上下方向の振動の定位の判定ができていないかを求める手法である。つまり感覚レベルで左右ないし上下方向の移動がギリギリ判定できている範囲を求めたい。この実験でも同様に1次元平面上で実験を行なう。

実験設定

縦91mm、横154mmのディスプレイが備わった把持物体で実験を行なった。ヴァーチャル空間内で把持物体の縦の位置を45mmに固定した1次元直線上で、2度振動を提示し、横方向の解像度を調べる場合は「どちらがより右だったか」、縦方向の解像度を調べる場合は「どちらがより手前だったか」を回答してもらう。提示振動の1回目と2回目の振動源の移動量を-40mm・-30mm・-20mm・-10mm・0mm・10mm・20mm・30mm・40mmと設定した。被験者は、24歳の男性3人で行なった。この実験では全員イヤーマフを装着してもらい、音は聞こえない状態で、且つ目を閉じた状態での手の感じる刺激の変化を回答してもらった。試行数90回、総試行回数180回である。

実験結果

以下に実験結果を示す。グラフの横軸は振動源の移動量になり、縦軸が比較対象と比べて、横の恒常法の場合は右だった、もしくは手前だったかと答えた割合になる。

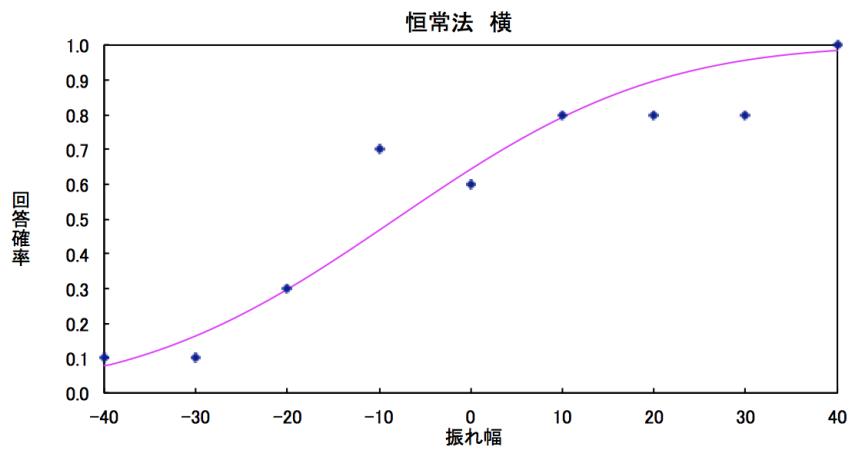


図 5.2: 恒常法による振動分布の解像度 横 : 被験者 A

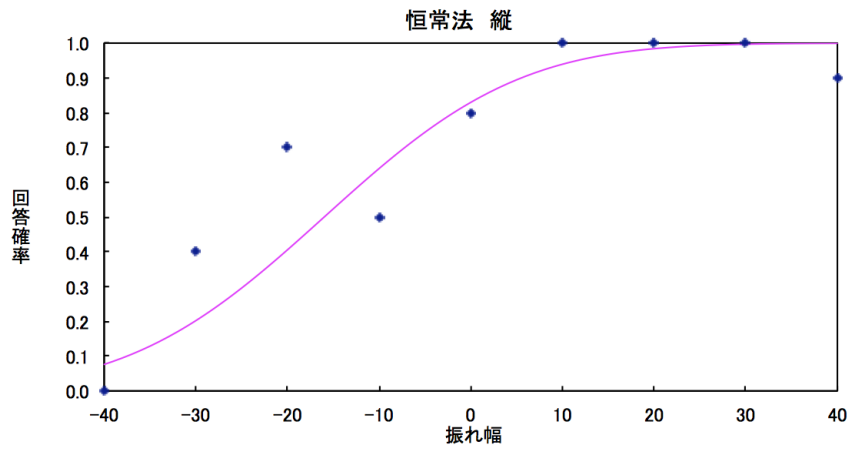


図 5.3: 恒常法による振動分布の解像度 縦 : 被験者 A

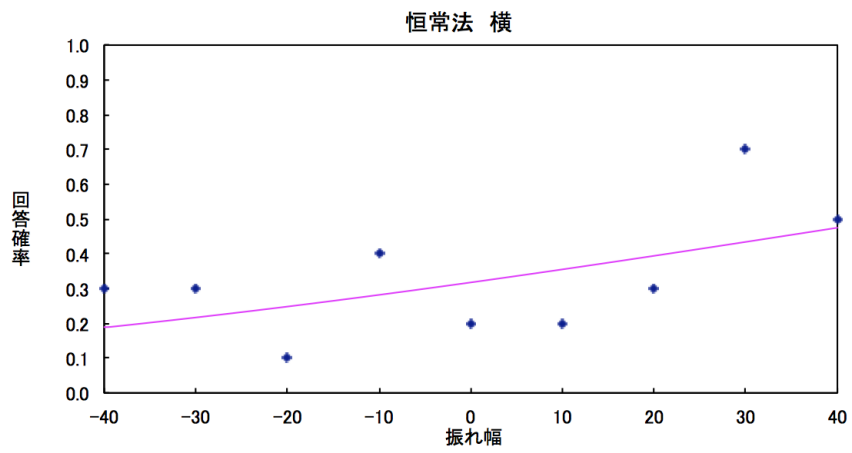


図 5.4: 恒常法による振動分布の解像度 横：被験者 B

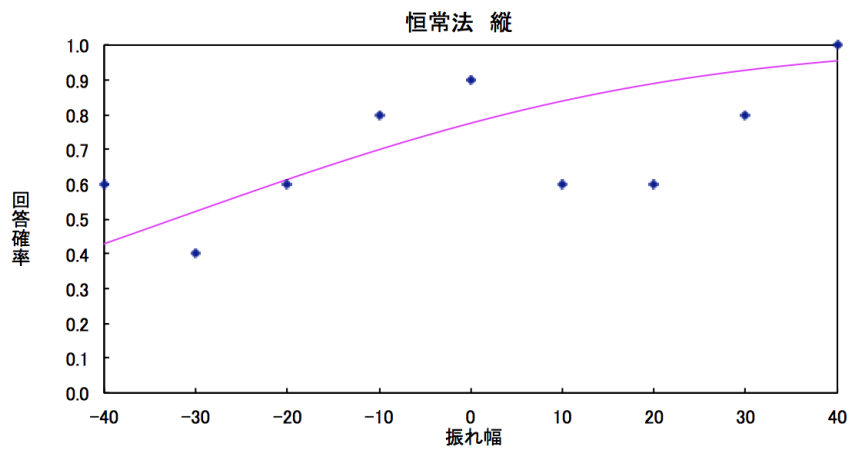


図 5.5: 恒常法による振動分布の解像度 縦：被験者 B

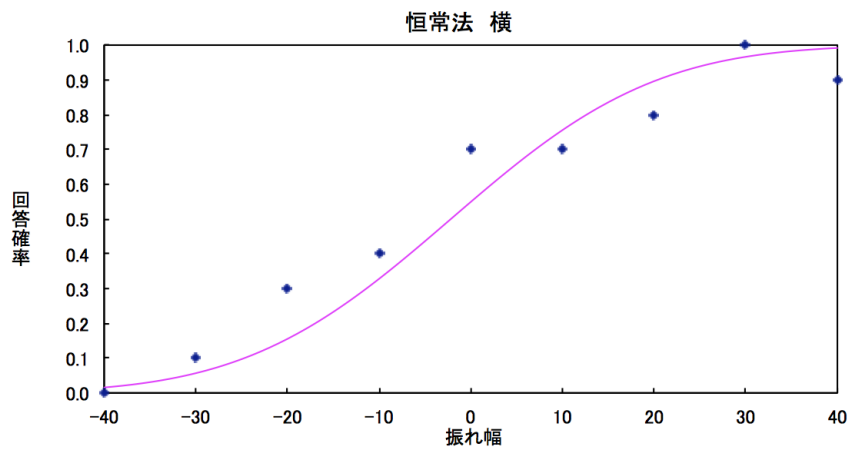


図 5.6: 恒常法による振動分布の解像度 横：被験者 C

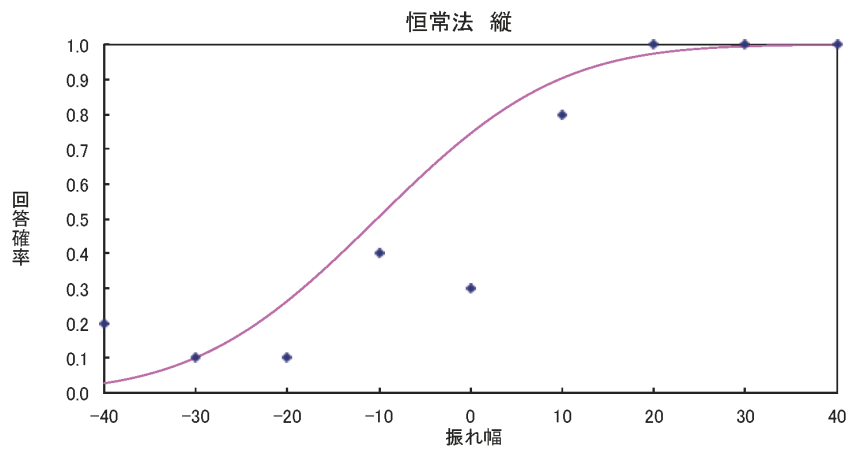


図 5.7: 恒常法による振動分布の解像度 縦：被験者 C

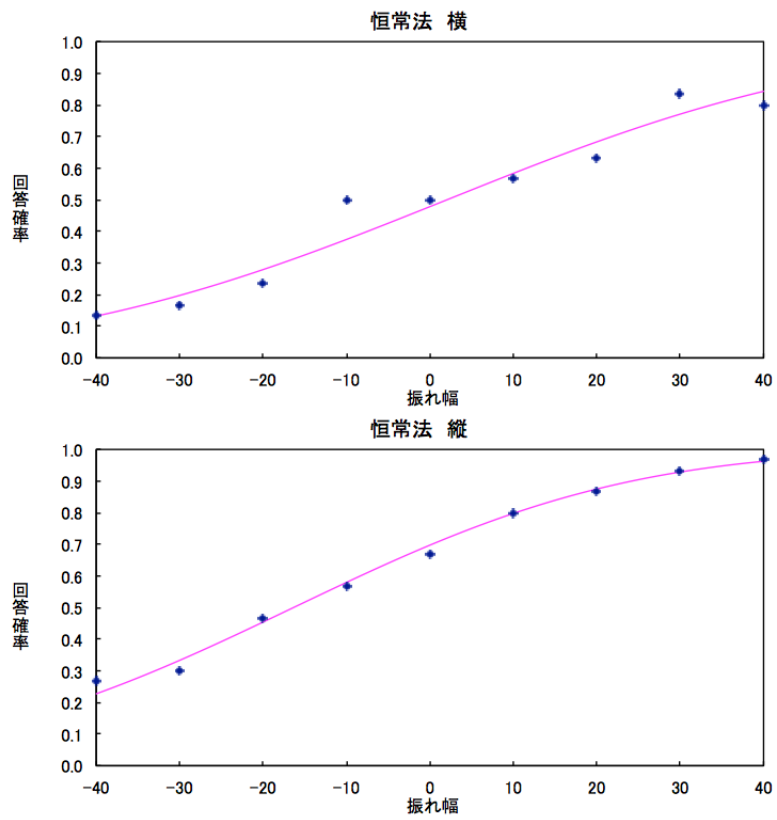


図 5.8: 恒常法による振動分布の解像度の平均の結果

被験者 A から見ていくと、横の結果は、振れ幅が $\pm 20\text{mm}$ の時でおおよそ 80 % の回答率が見られる。また振れ幅が 10mm の時に 80 % の確率で右だと回答していることから、とても敏感に触感が移動したことを知覚しているといえる。同様に、縦の結果でも、振れ幅が $\pm 20\text{mm}$ の時でおおよそ 40 % の回答率が見られる。また振れ幅が 10mm の時に 90 % の確率で手前だと回答していることから、かなり手前にシフトしている傾向が見られるものの、振れ幅が 30mm ずれた際には 75 % の確率で、触感が移動したと知覚していることがわかる。

一方、被験者 B の結果を見ると、著しく結果が悪い。横の結果から、全ての点の回答においてランダムに回答していたことが想定される。同様に、縦の結果では、すこし手前に来た際の違いを知覚できていることがわかるが、それでも横と同様ランダムな回答が見られる。

被験者 C の結果では、横の結果は、振れ幅が $\pm 20\text{mm}$ の時でおおよそ 70 % の回答率が見られる。また振れ幅が 10mm の時に 80 % の確率で右だと回答していることから、やや右側にシフトしているものの、振れ幅が 30mm ずれた際には 75 % の確率で、触感が移動したと知覚していることがわかる。同様に、縦の結果でも、振れ幅が $\pm 20\text{mm}$ の時でおおよそ 80 %、振れ幅が 20mm の際にはおおよそ 90 % の回答率が見られるため、すこし手前にシフトしているものの、縦の移動に関してもとても敏感に知覚できていることがわかる。

図 5.12 に示した 3 人の結果を踏まえると、この S 字を描く結果から 0mm の地点では、そもそも振動源は移動していないため、ほぼ 50 % の確率で回答している。中心から 30mm 離れた地点では 78 % の確率で左右の移動を知覚し、 40mm ではほぼ確実に左右の違いを知覚していることがわかる。この結果から、両端に設置した提示物体の場合 40mm の移動はほぼ確実に左右への移動を知覚し 30mm の移動の知覚には、個人差が見られるが殆どの場合知覚できることが推測できる。一方、縦の場合は、手前に 10mm ほどシフトしているが、移動感が得られる閾値は、 30mm 前後であることがわかる。この 10mm の誤差はデバイスを把持した際に、接地面積の多い手のひらが触れている面が筐体手前側になるため、より手前側が強く感じられると推測できる。また、2 名の被験者がほぼ 30mm ずらして提示することで移動感が知覚できていたものの、1 名に関してはその傾向が見られなかった。この

ことから、一部の人には触感の定位の移動があまり感じられず、触覚の移動感を提示しにくい場合がある。つまり、この傾向は立体視における立体盲のように、個人に関わることになる可能性もあるため、配慮が必要になる可能性も想定される。この実験より明らかになった。

5.2.2 触感の絶対位置の検証

実験目的

フォースリアクターを4つ搭載した両手持ちの箱型の縦91mm、横154mmのディスプレイが備わった把持物体を使用した際の2次元平面上の絶対位置の認識について検証する。聴覚知覚において上下左右の音量を変化させることで音源位置知覚の定位が変化することが知られている。同様に左右の振動の振幅の違いで、振動源の位置を認識できるか、検証を行なう。

実験設定

縦91mm、横154mmのディスプレイが備わった把持物体で実験を行なった。落下位置は前節の結果を参考に30mm間隔で20点ランダムに提示し、回答の際には、30mmより細かい15mm間隔でディスプレイ [図5.10] に提示されているように配置されたドット [図5.9] を参考に、落下位置を数字で答えてもらった。実際に提示している触感の位置は「1 3 5 7 9 19 21 23 25 27 37 39 41 43 45 55 57 59 61 63」の20点になる。この実験では、全員イヤーマフを装着してもらい、音は聞こえない状態で手の感じる位置を回答してもらった。試行数20回、総試行回数120回である。

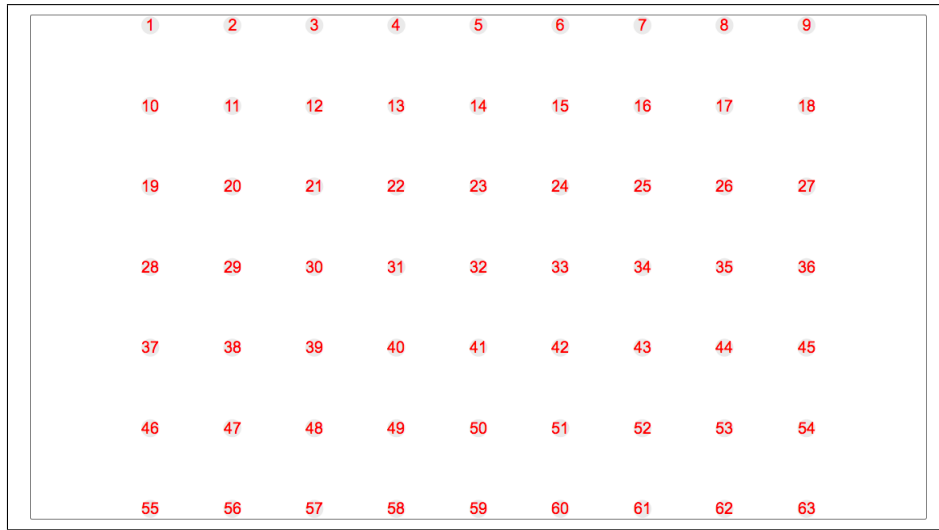


図 5.9: 15mm 間隔でディスプレイに提示したドット



図 5.10: ディスプレイに提示されているドット

実験結果

以下に実験結果を示す。青い線で結ばれた長方形は、実際に提示した触感の点群の内、外周に該当する長方形を示し、また赤い線で結ばれた長方形は、点群の内、内周に該当する長方形を表している。3つのグラフは、それぞれ被験者の回答結果を、また下のグラフでは、左側のグラフは実際の3人の回答位置をまとめて線で結んだ結果を、右側のグラフが期待される回答の理想の値を示している。

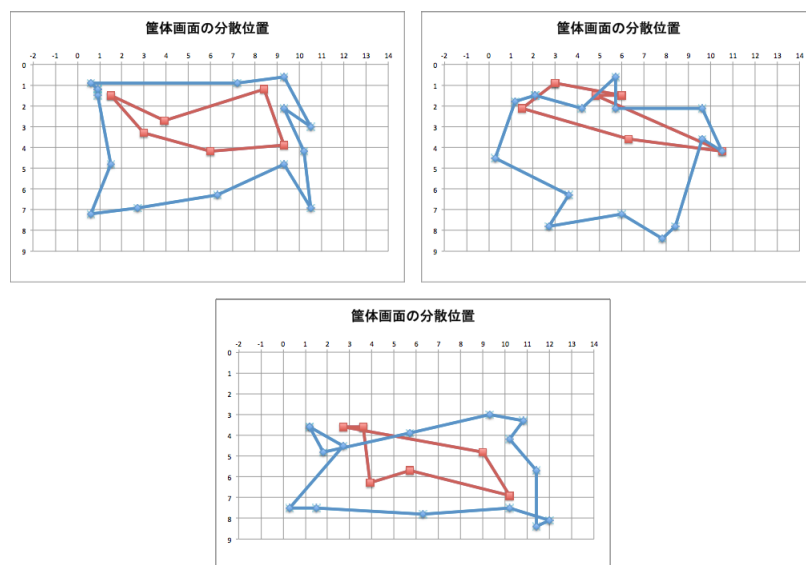


図 5.11: 被験者 3 人の絶対位置の回答結果

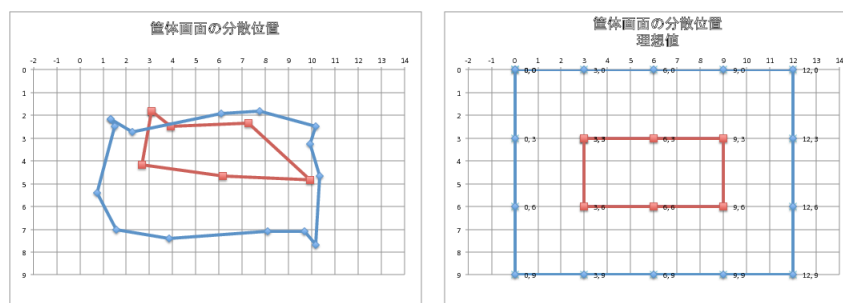


図 5.12: 絶対位置の回答結果

左上の被験者の結果からは、他の被験者に比べ全体的に綺麗な定位を示している。青い線で結ばれた長方形を見てみると、縦の誤差が10mmから15mm程度、また横の誤差も10mmから15mm程度となっており、提示位置全体にほぼ定位している傾向が見られる。しかし、赤い線で結ばれた長方形は、全体的に20mm以上、奥側に移動しているため、この被験者は、画面中央に提示された触感は画面奥に引きづられる傾向が見られる。

同様に右上の被験者の結果からは、全体的に奥側に引きづられた結果であることがわかる。さらに、青い線の結果から外周に沿って触感が提示した場合は端に定位するものの、中央に提示したものは、奥側に引きづられていることから、基本的には奥側の触感を強く知覚しているように見える。

一方、下の被験者の結果からは、先ほどの被験者とは引き換えに全体的に手前側に引きづられた結果であることがわかる。青い線の長方形の結果から、奥側の定位を示さず、中央から奥側で囲まれた範囲で定位を示したことが、結果から推測できる。

これらをまとめた図5.12の結果からは、青い線で結ばれた長方形を見てみると、縦の誤差が10mmから15mm程度、また横の誤差も10mmから15mm程度となっており、提示位置全体にほぼ定位している傾向が見られる。しかし、赤い線で結ばれた長方形は、全体的に20mm以上、奥側に移動しているため、この被験者は、画面中央に提示された触感は画面奥に引きづられる傾向が見られる。これらの結果をまとめると、本デバイスでは画面中央に提示した場合、理想的には30mmの間隔を開けて提示していても、10mm程度の間隔になり、奥側に引きづられる傾向が見られる。この傾向は、デバイスを把持する際の皮膚との接触面積に関わっていると推測できる。デバイス手前側では、手のひらで振動面を抱え込むため、より繊細な触感の違いを知覚できるのに対し、奥側では、指先だけで感じるため、細かい触感の変化を判断できない。そのために、奥側の触感は、曖昧な回答が得られたのではないかと推測する。

5.2.3 本章のまとめ

本章では、提案した手法で、触感を変化させることが可能であるかについて検証実験を行なった。具体的には、触感の重さと弾み感の変化を、今回構築した物理シミュレータのパラメータの変化から操作できるか、また触感の空間性を付与させるための触感の解像度の検証と2次元平面での触感の定位について検証を行なった。上下法によって検証した物理シミュレータのパラメータの変化の検証では、重さ、弾み感共に、やや実世界の触感とは誤差があるものの、パラメータの変化によって比較刺激を超えた触感が出せることがわかった。また、触感の解像度の検証では、個人差が見られるものの、触感提示位置を約30mm離すことが、提示位置が移動したと知覚できる最小の閾値として判断できるという結果が得られた。一方、ディスプレイ面上の2次元平面での触感提示位置の知覚では、縦には20mmほど、横には10mmほど縮小した範囲で空間の定位が見られ、デバイスを把持する際の振動子と皮膚の接地面積の関係から、画面中央部分に提示した場合には細かい触感の判断が出来ないため、奥側に引きづられてしまう結果が見られた。

この結果を踏まえると、今回提案したサンプリング触源と力積によって表される Tactie Force の畳み込みによって生成される触感は、物理シミュレータのパラメータで重さと弾み感に関しては操作が可能であり、空間性に関しては、触感は約30mm間隔で移動感を提示することができることがわかった。触感の材質感や触感定位が定まらないなど幾つか課題点が見られるが、本論文で提案する手法の効果を明らかにした。

第6章

結 論

6.1. おわりに

本論文では、音響生成手法に基づく触覚レンダリングについてまとめたものである。現在のコンテンツ産業を見てみると、古くから情報提示技術の発展と、それと平行してコンテンツを創るための技術が相互に発展してきた。音楽の分野でその具体的な事例を見てみると、コンピュータ音楽技術の発展に伴い、音楽の表現も広がっていった背景が見られる。YAMAHAのFM合成の特許の取得やMIDIの事例は、科学技術が芸術の分野に取り込まれていった事例として上げられるだろう。一方、触覚の分野では、物理シミュレーションを用いた実空間の再現による触覚の再現手法や、触感の再現環境を限定し計算コストを抑えてモデル化することによる触感の再現手法、計算を全く行わず触感を音響信号を用いて記録することによる触感の記録手法などといった、情報提示技術は発展してきているものの、触覚を伴うコンテンツを創るための手法や技術は未だ、確立できておらず、芸術の分野で取り上げられていない。

そこで本研究では、PhotoshopやIllustrator、MIDIやPro toolsといった、現在の視聴覚コンテンツを支えるツールと同じく、まだ確立されていない触覚コンテンツを実現するための”触覚を伴うコンテンツを創るための手法”について提案する。第1章では、日常に取り入れられている視覚・聴覚を対象にしたメディアの事例から、触覚を対象にしたメディアが求められる要件まとめた。ここでは、実世界における物理現象の再現ではなく、ヒトの五感を通ず感覚知覚原理において効果的な提示方法を、既に取り入れられているメディアを引き合いに、触覚を扱うメディアの可能性を述べた。

第2章では、触覚の感覚器官の構造と知覚原理に注目し、従来の触覚レンダリングの研究と触覚を伴うコンテンツ生成に着目した研究を紹介した。

第3章では、コンテンツ創造に向けた触感の再現手法のための必要条件を述べた。先行研究で取り上げた Doel らの音生成モデルに基づき、時間軸成分を持った接触に関わる「Tactile Force」と「サンプリング触源」を畳み込むことによって触覚を再現する手法を提案、触感を伴うコンテンツ実現までの流れを示した。

第4章では、第3章で並べた必要要件を満たす環境実装と構築を行なった。1) 触感を採集する 2) コンテンツにあった触源セットを作る 3) 提示物体の選択、または設計 4) 身体動作の適応 5) シミュレータ環境の構築の5つの段階に分けた触感を伴うコンテンツの制作フローに則り、試作コンテンツを実装した。第5章では、「Tactile Force」と「サンプリング触源」によって触感の編集が可能か検討し、また触感の空間性の解像度がどのくらいかを恒常法を用いて実験を行なった。

以上のように、本研究ではサウンドレンダリングの手法を主軸に、音響信号を用いて記録したサンプリング触源と力積で表される Tactile Force の畳み込みによる触覚レンダリングを提案した。

謝 辞

私の修士課程において、学生生活・研究共々、皆様に支えられてきました。本論文の最後に感謝の意を述べさせていただきます。

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科、リアリティメディアプロジェクトの 舘 暲特任教授には、定期的に開かれる輪講や個別ミーティングの際には、暖かく時には的確で厳しいご指導と励ましを頂きました。代々受け継がれた本当に恵まれた環境の中で過ごさせて頂きました。

修士1年の初めから本研究について暖かな指導と多くのチャンスをくださった慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科、リアリティメディアプロジェクトの 稲見 昌彦教授には心から感謝いたします。修士2年間で振り返ると、とても機会に恵まれた時間だったと思います。また定例ミーティングや学会発表、食事の席など様々な場面で、物事の捉え方について指導していただき、いままでになかった視点からの考え方を学ばせていただきました。

主査の加藤朗教授には、特に修士生活後半では大変ご迷惑をお掛けしましたが、他プロジェクトでありながら優しいお言葉をかけていただきありがとうございました。

副査の南澤 孝太准教授には、昼夜問わず、辛抱強くご指導いただきましたことを感謝いたします。山口情報芸術センター（YCAM）や日本科学未来館で開催された TECHTILE の活動では、触覚を通して参加者と係ることができ、数年後の未来を感じさせる、大変貴重な経験させていただきました。研究の取り組み方、また研究の方向性を見失いかけた際には何度も助けて頂きました。本当にありがとうございます。

また、KMD リアリティメディアプロジェクトのみなさまには、毎日楽しみながら研究に打ち込むことができる環境を作っていただきまして、大変感謝しています。

参 考 文 献

- [1] The University of Melbourne. CSIRAC. <http://ww2.csse.unimelb.edu.au/dept/about/csirac/>, 2013. [Online; accessed 13-December-2013].
- [2] MIDI Manufacturers Association. MIDI Manufacturers Association. <http://www.midi.org>, 2013. [Online; accessed 17-December-2013].
- [3] Tapio Takala and James Hahn. Sound rendering. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, volume 26, pages 211–220. ACM, 1992.
- [4] Synthesizing sounds from physically based motion. In *ACM SIGGRAPH 2001 Video Review on Animation Theater Program*, SVR '01, pages 59–, New York, NY, USA, 2001. ACM. Director-O'Brien, James F.
- [5] Doug L James, Jernej Barbič, and Dinesh K Pai. Precomputed acoustic transfer: output-sensitive, accurate sound generation for geometrically complex vibration sources. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 25, pages 987–995. ACM, 2006.
- [6] Nicolas Bonneel, George Drettakis, Nicolas Tsingos, Isabelle Viaud-Delmon, and Doug James. Fast modal sounds with scalable frequency-domain synthesis. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 27, page 24. ACM, 2008.
- [7] Changxi Zheng and Doug L James. Toward high-quality modal contact sound. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 30, page 38. ACM, 2011.

- [8] Jeffrey N Chadwick, Changxi Zheng, and Doug L James. Faster acceleration noise for multibody animations using precomputed soundbanks. In *Proceedings of the 11th ACM SIGGRAPH/Eurographics conference on Computer Animation*, pages 265–274. Eurographics Association, 2012.
- [9] Morton Heiling. sensorama. <http://www.medienkunstnetz.de/works/sensorama/>, 1962.
- [10] Moto-cross. http://www.arcade-museum.com/game_detail.php?game_id=12812, 1976.
- [11] SEGA. AfterBurner II. <http://archives.sega.jp/3d/ab2/>, 1987.
- [12] Aura Interactor. http://www.avsim.com/pages/0604/aura/aura_interactor.htm, 1994.
- [13] 任天堂. 振動パック. <http://www.nintendo.co.jp/n01/n64/option/sindop.html>, 1997.
- [14] SONY. DUALSHOCK. <http://www.jp.playstation.com/psone/peripheral/scph110.html>, 1997.
- [15] 任天堂. Wii Remote. http://www.nintendo.co.jp/wii/features/wii_remote.html, 1996.
- [16] Microsoft. Microsoft KINECT. <http://www.xbox.com/ja-JP/kinect>, 2010.
- [17] Microsoft. XBOX ONE インパルストリガー. <http://www.xbox.com/ja-JP/xbox-one/meet-xbox-one>, 2013.
- [18] 須佐育弥, 三武裕玄, 長谷川晶一, and 佐藤誠. 有限要素法による振動シミュレーションに基づいた力触覚レンダリング. 信学技報, 112(483):51–56, 2013.
- [19] 伊藤 謙治, 小松原 明哲, and 桑野 園子, editors. 人間工学ハンドブック. 朝倉書店, 普及 edition, 2 2012.

- [20] Kenneth Johnson. Neural basis of haptic perception. *Stevens' Handbook of Experimental Psychology*, 2002.
- [21] James J Gibson. Observations on active touch. *Psychological review*, 69(6):477, 1962.
- [22] Frank A Geldard and Carl E Sherrick. The cutaneous" rabbit": a perceptual illusion. *Science*, 178(4057):178–179, 1972.
- [23] Junji Sone, Takuya Mori, Ogi Itamoti, Takanori Nagae, Shoichi Hasegawa, Kouichi Konno, et al. Development of mechanism in multi-finger haptic display-development of haptic mechanism and fusion with spidar. *ASIA-GRAPH2008*, 2(1):91–96, 2008.
- [24] Hervé Delingette, Stéphane Cotin, and Nicholas Ayache. A hybrid elastic model allowing real-time cutting, deformations and force-feedback for surgery training and simulation. In *Computer animation, 1999. Proceedings*, pages 70–81. IEEE, 1999.
- [25] 幸伸 竹花, 育弥 須佐, and 裕玄 三武. 有限要素振動シミュレーションに基づく材質感の力触覚レンダリング. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 *Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan, Annual Conference*, 18:675–678, sep 2013.
- [26] Hsin-Yun Yao and Vincent Hayward. An experiment on length perception with a virtual rolling stone. In *Proceedings of Eurohaptics*, pages 325–330, 2006.
- [27] Katherine J Kuchenbecker, Joseph Romano, and William McMahan. Haptography: Capturing and recreating the rich feel of real surfaces. In *Robotics Research*, pages 245–260. Springer, 2011.
- [28] Sakiko Ikeno, Ryuta Okazaki, Taku Hachisu, Michi Sato, and Hiroyuki Kajimoto. Audio-haptic rendering of water being poured from sake bottle. In

- Advances in Computer Entertainment*, pages 548–551. Springer, 2013.
- [29] Kouta Minamizawa, Yasuaki Kakehi, Masashi Nakatani, Soichiro Mihara, and Susumu Tachi. Techtile toolkit: A prototyping tool for design and education of haptic media. In *Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference, VRIC '12*, pages 26:1–26:2, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [30] Yuki Hirobe, Takumi Yoshida, Shinobu Kuroki, Kouta Minamizawa, Katsunari Sato, and Susumu Tachi. Colorful touch palette. In *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies, SIGGRAPH '10*, pages 10:1–10:1, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [31] Sho Kamuro, Yuta Takeuchi, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. Haptic editor. In *SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies, SA '12*, pages 14:1–14:4, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [32] Dinesh K Pai, Uri M Ascher, and Paul G Kry. Forward dynamics algorithms for multibody chains and contact. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 857–863. IEEE, 2000.
- [33] Kees Van Den Doel, Paul G Kry, and Dinesh K Pai. Foleyautomatic: physically-based sound effects for interactive simulation and animation. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 537–544. ACM, 2001.
- [34] NVIDIA Corporation. Physx. http://www.nvidia.co.jp/object/physx_new_jp.html, 2008.
- [35] Erwin Coumans. Bullet physics engine, 2005.
- [36] Unity Technologies. Unity. <http://japan.unity3d.com>, 2005.
- [37] OpenAcoustics. OpenAcoustics Cook Book. <http://www.openacoustics.org>, 2012. [Online; accessed 9-October-2012].

- [38] 佐藤 雅弘. *FDTD*法による弾性振動・波動の解析入門. 森北出版, 11 2003.
- [39] 橋本 修. 実践 F D T D 時間領域差分法. 森北出版, 9 2006.
- [40] 小松 敬治. 機械構造振動学 - *MATLAB* による有限要素法と応答解析. 森北出版, 3 2009.
- [41] 佐藤 泰夫. 弾性波動論 (1978年). 岩波書店, 3 1978.
- [42] Juan Pablo Bello, Laurent Daudet, Samer Abdallah, Chris Duxbury, Mike Davies, and Mark B Sandler. A tutorial on onset detection in music signals. *Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on*, 13(5):1035–1047, 2005.
- [43] Lucasfilm Ltd. Starwars. <http://starwars.com>, 1977.
- [44] Ubisoft Entertainment. Assassin’s creed 4 black flag. <http://www.ubisoft.co.jp/ac4/>, 2013.
- [45] プリモ社. プリモ社 低周波マイクロホン em156s5a. <http://www.primocorp.co.jp/product/PDF/EM156S5A.pdf>.
- [46] Roland. Duo-capture ex. http://www.roland.co.jp/products/jp/DUO-CAPTURE_EX/.
- [47] audio technical. audio-technical マイクアンプ at-ma2. http://www.audio-technical.co.jp/atj/show_model.php?modelId=896.
- [48] Miller Puckette, David Zicarelli, et al. Max/msp. *Cycling*, 74:1990–2006, 1990.
- [49] Arduino. Arduino. <http://arduino.cc>. [Online; accessed 19-October-2013].