

身体性に基づいた感性情報メディアに関する研究

**Studies on Kansei Information Media
based on Embodiment**

2018年2月

中島 武三志

Musashi NAKAJIMA

身体性に基づいた感性情報メディアに関する研究

**Studies on Kansei Information Media
based on Embodiment**

2018年2月

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科
表現工学専攻 音楽情報科学研究

中島 武三志

Musashi NAKAJIMA

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	本研究の目的	7
1.3	本論文の構成	8
	参考文献	12
第2章	水を扱う道具のシグニファイアを用いた録音・編集作業の円滑化	15
2.1	はじめに	15
2.2	関連研究	16
2.3	DropNotes の提案	18
2.4	システム評価	25
2.5	おわりに	38
	参考文献	38
第3章	日用品のシグニファイアと感性的特徴を用いたアート作品創作の円滑化	41
3.1	はじめに	41
3.2	関連研究	43
3.3	MITAI の提案	44
3.4	システムの評価	51
3.5	おわりに	63
	参考文献	63
第4章	水の形状変化を用いた遠隔地における自然の実在感と美の呈示	65
4.1	はじめに	65

4.2	関連研究・作品	67
4.3	霞鈴の提案	68
4.4	展示活動と考察	72
4.5	おわりに	78
	参考文献	79
第5章	物理的実体を持つ指型叩打装置によるリズム演奏者の存在感呈示	81
5.1	はじめに	81
5.2	関連研究	83
5.3	ユビキテルの提案	84
5.4	展示活動と考察	89
5.5	おわりに	94
	参考文献	94
第6章	咀嚼音の遅延フィードバックによるクロスモーダル知覚を用いた食感操作	97
6.1	はじめに	97
6.2	遅延フィードバックによる食感操作	99
6.3	実験装置	101
6.4	実験方法	101
6.5	実験結果	108
6.6	考察	112
6.7	おわりに	116
	参考文献	117
第7章	結論	119
	謝辞	122
	研究業績	125

目次

1.1	感性情報の伝達モデル ([長尾, 1999] からデザインのみ一部改変)	2
1.2	感性情報メディアが抱える課題	4
2.1	作品「DropNotes」の外観	18
2.2	システム構成図	21
2.3	ボトルスタンドの外観	22
2.4	ボトルスタンドの構造	23
2.5	編集モード	24
2.6	音高と再生タイミング	25
2.7	プロジェクションマッピング	26
2.8	iPad アプリ	26
2.9	GarageBand ウィンドウの例	30
2.10	AUSampler ウィンドウの例	31
2.11	サンプリング時間	32
2.12	音数の推移	34
2.13	音量ヒストグラム	35
3.1	作品「MITAI」の外観	43
3.2	システム構成	47
3.3	引き出し	48
3.4	ライト	48
3.5	扇風機	49
3.6	コーヒーミル	50
3.7	スピーカ	50

3.8	サービス選択画面	52
3.9	ノード	52
3.10	ネットワーク構築画面	53
3.11	ノブ (左) とスライダ (右)	54
3.12	作品 (1) の印象順位得点	55
3.13	作品 (2) の印象順位得点	56
3.14	作品 (3) の印象順位得点	57
3.15	作品 (4) の印象順位得点	58
3.16	作品 (1) の使いやすさ順位得点	59
3.17	作品 (2) の使いやすさ順位得点	60
3.18	作品 (3) の使いやすさ順位得点	61
3.19	作品 (4) の使いやすさ順位得点	62
4.1	作品「霞鈴」の外観	69
4.2	システム構成図	71
4.3	アクリルストーンを敷き詰めた様子	72
4.4	水槽の土台	73
4.5	LED マトリクスの配色パターン	74
4.6	作品展示の様子	75
4.7	選定された草花	76
5.1	作品「ユビキテル」の外観	84
5.2	システム構成	86
5.3	指のシリコン型	87
5.4	指を振り上げた状態	88
5.5	指を振り下ろした状態	89
5.6	タップ入力センサ	90
5.7	作品展示の様子 (SICF18)	91
6.1	実験で使用したポテトチップス	99
6.2	システム構成図	102

6.3	ヘッドセット装着時	103
6.4	咀嚼音信号のパワースペクトル	106
6.5	呈示音と咀嚼行為とのずれ知覚	108
6.6	呈示音と実際の咀嚼音とのずれ知覚	109
6.7	推定された心理測定関数（咀嚼行為とのずれ）	111
6.8	推定された心理測定関数（咀嚼音とのずれ）	112
6.9	遅延時間とザクザク得点の関係	113
6.10	咀嚼音の例	114

表目次

2.1	水滴情報と音情報の関係	20
2.2	実験参加者の属性	27
2.3	水滴と円の音量誤差	35
4.1	取得した気象情報の一部	74
4.2	徳島県内の各自治体の花	77
6.1	ずれ知覚に関する実験でのアンケート項目	107
6.2	ザクザク感に関する実験で用いた評価尺度	107
6.3	心理測定関数の推定結果	110

第1章

序論

1.1 研究の背景

1.1.1 感性に作用するデジタルメディア

人間の感性に作用する情報を伝達することは、メディアが果たすべき重要な役割である。デジタルメディア技術は、鑑賞者に驚きや感動を与える新たな表現やコンテンツを創出し、伝える手段としても活発に利用されており、感性に作用する情報を伝達するデジタルメディアの必要性はますます高まっている。しかし、感性に作用する情報の伝達手段については、物理情報や論理情報と比較して十分に検討されていない。これまで、音や光といった物理情報、図形や文字といった論理情報を伝達するデジタルメディアは正確性や再現性、効率性等を客観的、定量的に評価することによって発展してきた。感性に作用する情報を伝達するにはこうした観点だけでなく、人間の感性を解明し、デジタルメディアへと応用するアプローチが必要不可欠である。

感性を科学的観点から明らかにし、製品開発や新たなメディア、サービスなどへと応用しようとする学問分野は、「感性科学」、「感性工学」、「感性情報学」などと呼ばれ、今日まで発展している。「感性」の厳密な定義については研究者によって異なり、一致した見解を得ることは困難であるが、井口は感性の中でもひらめき、直感力、想像力といった説明しにくい能力や、芸術家の研ぎ澄まされた感性のような“深い感性”に対し、外界からの刺激に対し人間は「どう感じるか」という問題に対して、定性的あるいは定量的に記述できる範囲を“浅い感性”と呼び、情報科学的に扱うことのできる感性の領域を示している[1]。椎塚は感性、感性情報、感性情報処理をそれぞれ「うつくしき、こちよき、おもしろさ、たのしさなどのポジティブな情動を必須の属性とする心のはたらき(反応)」、「感性

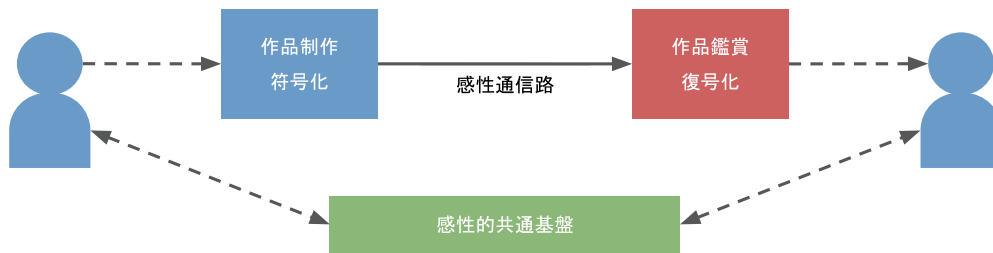


図 1.1 感性情報の伝達モデル ([長尾, 1999] からデザインのみ一部改変)

反応を生み出す刺激となる情報」, 「感性情報を集めたり, 作ったり, 作り変えたり, 蓄えたり, そして伝えたりする手続き」と捉え [2], 感性を科学的に取り扱うための枠組みを与えている。感性科学で取り扱う感性情報とは, 外界からの刺激に対して生じる定性的, 定量的に記述可能な情動や印象, イメージ等であり, 感性とはそれらを生じさせる心の機能と捉えることができる。感性情報の伝達に関しては, 物理情報や論理情報と同様にモデル(図 1.1)化がなされており [3], このモデルを基に, アートにおける感性情報伝達の特徴を考慮し, さらに発展させたモデルも提案されている [4]。これらのモデルでは, 特定の音楽や絵画, 表情や仕草といった感性に関わる表現は, 感情や印象等の様々な感性情報が符号化されたものであり, 受け手による感情や印象等の受容は, 感性情報の復号化と捉えられる。感性的基盤は, 感性情報の符号化・復号化を行う写像であり, 感性的基盤によって感性情報は符号化され, 同様に心に生じる感性的反応として復号化される。また, 感性情報は物理・論理情報へと符号化されることで伝達される上位の情報であり, 本研究では感性情報の伝達を第一義とするメディアを, 感性情報メディアと考える。感性情報メディアを理解する上で, 感性情報の伝達モデルは非常に有用であるが, 感性情報メディア研究は比較的新しい分野であり, 物理情報や論理情報と比較して感性情報は主観的, 多義的, 非言語的, 暗示的である。そのため, 物理・論理情報と比較して未だ解明されていない点も多く, 人の心に作用する多様で豊かな感性情報を解明し, 伝達可能にしてゆくことが求められる。

コンテンツ創作者の視点から見れば, デジタルメディアは感性に作用する表現を他者に伝える手段でもある。しかし, コンテンツ制作には特別な訓練や技術が必要であり, 初心者には敷居が高かった。そこで, 専門的スキルを持つ一部のコンテンツ創作者だけでな

く、アマチュアのクリエイタによる創作活動を支援するデジタルメディア技術も進歩している。コンテンツ創作支援としては、ユーザが鉛筆で画用紙に描いたデッサンの画像とモチーフに関するデータを入力とし、ユーザへのアドバイスを出力する基礎的鉛筆デッサン学習支援システム [5] や、遺伝的アルゴリズムをもとにしてユーザの要求に合った配色・フォント案を作成し、作成案から受ける印象をファジィ推論で評価するカラーポスター作成支援システム [6]、プロダンサーの実演から採取したモーションキャプチャデータを利用し、クラシックバレエの振付を Web 上で対話的に創作し、3次元 CG アニメーションでシミュレーションできるバレエ振り付け創作支援システム [7]、ハーモニーや即興演奏の旋律などを生成し、提案するシステム [8, 9] など多数研究されている。また、後藤は初音ミク [10]、ニコニコ動画 [11]、ピアプロ [12] といった音楽制作、配信メディアを例に挙げながら、技術の発展に伴って創作への敷居が下がり、誰もが創作活動に参加できる CGM (Consumer Generated Media, 消費者生成メディア) 現象のさらなる発展を予想している [13]。このように、感性に作用する表現を伝達するデジタルメディア技術は、専門的スキルを持つ一部のコンテンツ創作者だけでなく、より多くの人同士が感性情報をやりとりできるよう発展してゆくことが求められている。

1.1.2 感性情報メディアの抱える課題

感性情報の伝達は機械ではなく人同士の活動であり、伝達される感性情報も多様である。誰もがより豊かな感性情報を伝達可能になること、さらにそのようなメディアの評価法が確立されれば、感性情報伝達の観点からメディアを拡張し、価値あるメディア体験の創出に貢献できる。これまで、感性的基盤の解明に主眼が置かれた研究は数多く報告されているが、それだけでは、誰もがより豊かな感性情報を伝達可能な感性情報メディアの実現には不十分である。感性情報メディアの抱える課題は、先述の感性情報伝達モデルに基づいた以下の3つの観点から整理・具体化することができ、これらの課題を総合的に解決してゆく必要がある。

1. 感性情報の符号化（表現）
2. 感性情報の復号化（受容）
3. 感性的共通基盤

図 1.2 は、感性情報の伝達を表しており、表現者による作品の表現という形で感性情報

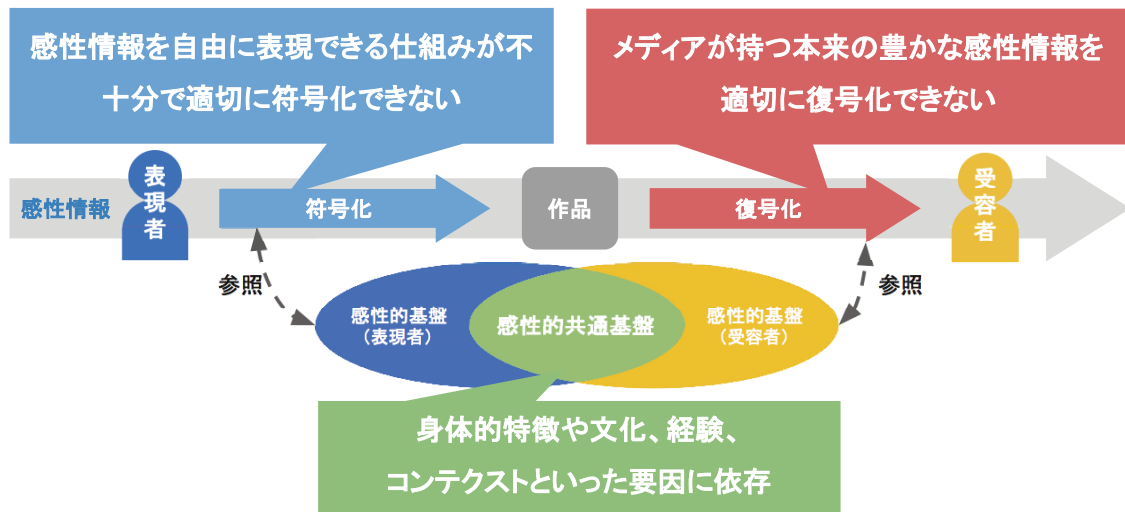


図 1.2 感性情報メディアが抱える課題

が符号化され、受容者による作品の受容という形で感性情報が復号化されている。感性的基盤は感性情報の符号化、復号化を行うための写像であり、表現者は自身の感性的基盤を元に感性情報を作品へと符号化し、受容者も自身の感性的基盤を元に作品から感性情報を復号化する。感性的共通基盤は両者の感性的基盤の共通部分である。符号化、復号化に用いられる感性的基盤が共通しているほど、表現者-受容者間で伝達される感性情報は同一の情報へと近づく。

図中の感性情報の符号化（表現）においては、表現したいコンテンツや使用するインタフェースに関する専門的な知識を必要とするなど、未だ多くの障壁が残っている。感性情報の符号化における負担を軽減し、誰もが自由な感性で表現可能なインタフェースを構築する必要がある。

感性情報の復号化（受容）においては、表現された本来の豊かな感性情報を受容者が適切に受容できる仕組みが十分に考慮されていない。感性情報の伝達過程における損失を防ぎ、本来の豊かな感性情報を受容者が適切に復号化できるようなインタフェースを構築する必要がある。

感性的共通基盤においては、物理情報や論理情報が機械同士共通の基盤によって符号化・復号化されるのに対し、感性情報の符号化・復号化は身体的特徴や文化、経験、コンテ

コストといった要因に依存している。人間や状況に依存する感性的基盤の差異を適切に把握し、感性情報を調整する技術が確立されることで、感性的基盤に差異が生じても感性情報を適切に伝達可能となる。

これらの課題を克服し、表現者が自由な感性で直感的に感性情報を表現できれば、コンテンツ創作の敷居が下がり、より多くの人々が創作活動に参加できる。また、従来のデジタルメディアで十分伝達できなかった感性情報を呈示したり、感性情報の復号化における個人間の差異を調整できれば、より多くの人に豊かなメディア体験を提供でき、表現者-受容者間の相互理解も深まる。こうした技術の蓄積により、人々の生活や心を豊かにする技術として、社会や学問分野の発展に貢献することが期待できる。

1.1.3 身体性と感性

人間の認知過程は身体に深く依存しており、このような特性は身体性と呼ばれている [14]。人間は、身体に備わる複数の感覚器官を通じて実世界環境を知覚し、複数の運動器官を介した身体動作によって実世界環境へとはたらきかける。また、身体的体験は様々な心の感性的反応を伴い、感性的反応もまた身体表現として現れる。そのため、身体性は感性情報の伝達においても重要な役割を担っていると考えられ、感性との密接な関係について様々な観点から議論されている。

心理学では古くから、悲しいから泣くのか（キャノン・バード説）、泣くから悲しいのか（ジェームス・ランゲ説）と言った議論が行われてきた。Kleinkeらは、意図的に作った笑顔であっても、感情を明るくできることを実証している [15]。また Aucouturierらは、実験参加者による音読の際に、特定の感情フィルタを通した音声を聴取させると、声の変化に気づいていないにもかかわらず、実験参加者自身の感情を変化させる事が可能であることを明らかにしている [16]。これらの研究結果は、身体表現が感情体験に影響を与える可能性を示唆している。

HCI (Human-Computer Interaction) の分野においては、身体を通じた実世界環境とのインタラクションがデジタルメディアとの直感的なインタラクションとして応用されている。Gibsonは、環境が動物に対して行為を与えるという性質を“アフォーダンス”と呼び、環境や身体的変化の次に精神活動が出現する、という心身二元論ではなく、環境の諸変化が常に大脳を駆動し、その諸変化が統合されて意識、知覚事象が出現し、現れた精神活動は常に環境と大脳に付き従う変化であり、その諸変化は環境、身体的変化に対置され

るものではないと捉えた [17]. このアフォーダンスの概念は Norman によってインタラクシオンデザインへと応用され, ユーザに対して特定のアフォーダンスの知覚を促す“シグニファイア”の重要性が唱えられている [18]. 他にも, 人間の多様な身体動作に着目したコンピュータの利用形態として, フィジカルコンピューティング [19], ウェアラブルコンピューティング [20], NUI (Natural User Interface)[21] といった概念が提唱されており, これらの概念に基づいたメディアデバイスが盛んに提案, 実践されている. 中でも, 実態が掴みにくい情報やその操作を, 人間が自然と身につけてきた実世界とのインタラクシオンによって, 直感的に分かりやすくしようとする研究理念として, 石井は Tangible Bits[22] という概念を提唱した. 人間の身体性に着目したこれらの概念は, 人間が日常的に行う自然な身体動作を情報操作の手段として利用しており, 直感的で使用しやすく, ユーザへの負担が少ないインタフェースを目指している.

アート・エンタテインメント分野においては, 人間の五感と身体動作によるインタラクシオンが様々な感性的体験を提供する手段として活用されている. マルチモーダルな感覚刺激を呈示し, 身体を存分に駆使する体験を提供するコンテンツが数多く発表されており, 人間の多様な身体的体験がモチーフに使われている. ソリッドレイ研究所による“飛翔体験”という作品では, ブランコに座った状態で床と壁に投影された景色が変化し, 巨大ブランコに乗ったような浮遊感を疑似体験できる [23]. また, Haimes らは風鈴の音を聴く体験に着目し, 台風の接近に関する情報を風鈴の音で知らせる作品“Taifūrin”を発表している. Haimes らはこの作品を通じ, 侘び寂びとして知られる日本の伝統的な美学と現代のインタラクティブ作品との融合を目指している [24]. 他にも, Geiger らは, 展示会等でアーチェリー体験ができる 3D シミュレータを製作し, 展示会参加者の興味を引くゲームレベルのデザインと, 初心者に対するアーチェリー動作の練習支援を目的としている [25]. こうしたコンテンツ内での体験は実際の原体験とは異なるが, 様々な原体験中のオブジェクトやインタラクシオンをモチーフにすることで, その体験の代替として抽象化・記号化された疑似体験である. そして, この疑似体験は原体験と同様に人間の感性へと作用し, 特定のイメージや印象といった感性情報, あるいは作品の持つメッセージとして体験者に受容されている.

VR (Virtual Reality) / AR (Augmented Reality) の分野においては, 複数の感覚刺激間の相互作用を人工的に引き起こし, 知覚に影響を与えるクロスモーダルメディア技術が盛んに研究・開発されている. 盛川らはシースルー型 HMD (Head Mounted Display) を用いて

身体部位上に仮想物体を表示し、身体と仮想物体が接触するように表現することで生じる微弱な触感（微触感錯覚）に関して、基礎的な検討を報告している [26]。また、鳴海らは満腹感の手がかりとなる要因として「食品の見た目のサイズ」に着目し、シースルー型 HMD を利用して食品の見た目を操作し、同量の食事から得られる満腹感を操作する「拡張満腹感」システムを提案している [27]。上記の研究例では、複数の感覚刺激間の相互作用を人為的に引き起こすことによって、人間の知覚特性を明らかにしたり、日常生活の便宜を図る手段や、新たな体験型コンテンツへの応用を目指している。

人間の認知過程における身体性は様々な立場から解明や応用が進められており、感性情報を伝達する上でも重要な手がかりと考えられる。中でも、多様な身体動作や日常で慣れ親しんだオブジェクトの持つシグニファイアを応用したインタラクション手法は、自然で直感的な感性情報の表現を可能にするインタフェースとしての応用が考えられる。また、実際の身体的体験をモチーフとしたマルチモーダルなインタフェースは、より豊かな感性情報の呈示手段となり得る。さらに、複数の感覚器官同士のクロスモーダル知覚を人工的に生み出し、擬似的に得られる感覚の操作手法を明らかにできれば、感性的基盤の個人差に応じて感性情報を調整する役割として応用できる。しかし、感性情報を伝達するメディアとしての観点からは、これらの身体性が持つ意義について十分な議論がなされておらず、身体がどのような感性情報において、どれほどの重要性を持っているかなど、その詳細については未だ明らかになっていない。

1.2 本研究の目的

本論文では、誰もがより豊かな感性情報を伝達できる感性情報メディアの実現を目指し、感性情報伝達における身体のはたらき（身体性）を明らかにする。具体的には、身体性を示す概念である「シグニファイア」、「マルチモーダル知覚」、「クロスモーダル知覚」に着目し、感性情報の表現・受容における以下の3つの課題解決策としての効果を明らかにする。

まずはじめに、より多くの表現者が直感的にコンテンツを創作可能にする手段として、人工物が持つシグニファイアや感性的特徴に着目し、感性情報表現の円滑化に取り組む。次に、感性情報の伝達過程における損失を防ぎ、呈示された感性情報が受容者によって適切に復号化されるための手段として、物理的実体をもつオブジェクトの動きや見た目、質感などを利用したマルチモーダルな感覚刺激に着目し、メディアアート作品の制作・展示

活動を通じて豊かな感性情報呈示手法の確立に取り組む。さらに、個人間における感性的基盤の差異を適切に把握し、感性情報を調整する手段として、クロスモーダル知覚と呼ばれる複数の感覚刺激間の相互作用に着目し、感性情報を調整するための具体的な手法について明らかにする。このように、本論文は実証に基づいた科学的アプローチ、及び作品の表現・展示活動に基づいた芸術的アプローチから、様々な感性情報の伝達における身体性を多角的に論じる。

1.3 本論文の構成

第1章では本研究の背景、目的、本論文の構成について述べる。本研究の背景では、創作物であるコンテンツを媒介するデジタルメディアにおいて、人間の感性を理解し喚起することの重要性や、誰もが感性に作用する情報を円滑にやり取りできるメディア技術の必要性について述べる。そして、感性情報を円滑にやり取りする手段として、人間の身体性と感性との関係に着目し、心理学、HCI、アート・エンタテインメント、VR/ARといった多様な研究分野を概観する。次に、本研究の目的として、誰もがより豊かな感性情報を伝達できるメディアの実現を目指し、特に感性情報伝達における身体性の解明へ向けた研究指針を示す。以降、第2章と第3章では、感性情報の表現をより円滑にする手段として、人工物の持つシグニファイアと感性的特徴に焦点を当て、音楽やインタラクティブアートといった表現の円滑化について論じる。第4と第5章では、より豊かな感性情報の呈示手段として、マルチモーダルな感覚刺激に焦点を当て、自然の实在感や美、音楽演奏者の存在感といった感性情報の呈示方法について論じる。第6章では、感性情報の調整手段として、クロスモーダル知覚に焦点を当て、食体験における食感の調整方法について論じる。

第2章では、音楽創作の円滑化について論じる。音楽創作における楽譜は音楽を表現するメディアであるが、従来の五線譜やピアノロールといった音楽情報の記録方法は、記譜法やピアノ鍵盤に関する知識が必要であった。そこで本章では、日常生活の中で慣れ親しんだ道具のシグニファイアによる直感的な音楽創作を実現する試みとして、特に音素材の録音・編集作業に着目し、両作業の直感的操作とシームレスな統合を目的とする。具体的には、ピン、スポイト、ろうとといった道具によって直感的に水を操作できる体験を音楽創作へと応用した、色水の図形楽譜型メディア「DropNotes」を提案する。水を扱う道具に着目した理由として、これらの操作は多くの身体動作（ろうとを持ってピンに挿入する、スポイトを持って水を吸い上げる等）を伴い、人間はそうした動作を無意識に身につけて

いることが挙げられる。また、水は日常的に触れる機会の多い慣れ親しんだ物質である。水は特定の形状を持たず、水滴の滴下量に応じて形状を連続的に操作できるため、音情報とのマッピングをする上でのメリットもある。また、色水を用いることで視覚的な美に加え、五線譜と比較した自由度の高さと直感性を兼ね備えた図形楽譜としての価値を付加することが期待できる。これにより、専門的な訓練を受けていない人にとっても音楽という感性情報を円滑に表現しながら、同時に創作者自身が本作品の体験者として有意義な感性体験を享受できる手段を提供する。本章では作品コンセプトのうち、「直感的」や「分かりやすさ」といった点を評価するため、録音、および音素材配置の機能に関して既存の作曲ソフトと比較実験と考察を述べる。録音に関しては、録音作業にかかった時間の比較により、どちらがより効率よく録音作業を実行できたかを考察する。また、音素材の配置機能に関しては音楽作品のラフスケッチ作業を想定し、実験参加者によって配置された音素材数の時間変化を記録し、ラフスケッチ作業の進展と収束にかかる時間の差異を考察する。

第3章では、鑑賞者と作品との対話をモチーフとしたアート作品やエンタテインメント創作の円滑化について論じる。このようなインタラクティブアートや電子玩具、電子楽器などのインタラクティブな作品やシステムを創作する際、適切なシグニファイアや特定の感性情報を持つインタフェースを一からデザインし、制作するのは困難である。しかし、身の回りの人工物には、直感的な操作性といった特質や、様々なイメージや印象、意味といった感性的特徴をすでに持っている。そうした人工物の持つシグニファイアや感性的特徴を柔軟に再利用、再構成できれば、インタラクティブなアート・エンタテインメント表現を創出する上で非常に有用である。そこで本章では、日用品が持つシグニファイアや感性的特徴を活かし、様々な音素材を奏でるインタラクティブアート創作メディア「MITAI」を提案する。本作品では、日用品に対する何気ない行為に対し音素材を割り当てて“楽器”と見立てることで、日用品の持つ意味を自由な解釈で変容させ、感性に作用する新たなインタラクティブアートを創出することができる。この章では、本作品の技術的詳細について述べ、いくつかの日用品と音素材を組み合わせた応用例を示す。その後、MITAIによって実際に創出された体験から得られる印象や今後の課題に関して考察する。

第4章では、人間が自然を捉える際に感じ取る美や癒やしといった感性情報の呈示方法について論じる。人間が自らの身体で自然を捉える行為は、気温や湿度といった単なる物理情報の知覚のみならず、美や存在感、癒しなど、感性にも大いに作用する重要な体験である。このような自然の持つ感性情報を呈示する手段として、以前からアクアリウム、庭

園、生け花、盆栽などの自然を表現した鑑賞物が親しまれている。これらは擬似的な自然環境を構築することで自然の美を創出する感性情報メディアであり、生活空間に「小さな自然の姿」を持ち込み、彩りや癒しを付加する手段として利用されている。一方、異なる場所に実在する自然の姿を呈示する一般的なデジタルメディアとして、映像メディアが挙げられる。しかし、人間は本来、様々な感覚器官で自然の姿を感じ取っており、そうした体験は身体性が大きく関わるマルチモーダルな体験である。遠隔地に存在する自然の持つ感性情報をより効果的に伝えるには、実体のある物質の持つ立体的な視覚情報や触覚、聴覚といったマルチモーダルな感覚刺激が重要である。そこで本章では、感性情報をマルチモーダルな感覚刺激によって呈示するメディア創出の試みとして、実際の水の形状を実際にコントロールすることによって地球上の任意の土地の水循環（蒸発、凝結、降水からなる地球上の水の変化）を表現し、気象状況に含まれる美や癒しといった感性情報を呈示するメディア「霞鈴」を提案する。水は特定の形状を持たず、ダイナミックに形状が変化する物理的特徴を持ち、地球上の水循環は蒸発、凝結、降水を繰り返す地球上のプロセスであり、気象現象として日常生活とも密接に関わっている。水と地球上の水循環はこうした物理的特徴のほかに、涼しさ、清潔さなど豊かな感性的特徴を持っている。本章ではこれらの特徴を応用し、自然の持つ物理情報と感性情報とが融合した豊かなメディア体験の創出を目指す。本作品では、Webによって取得された気象データに基づき、霧生成→凝結→水滴落下のサイクルを人工的に制御し、降水や水循環を表現する。また、水のダイナミックな変化を水琴窟の音色とLEDの波紋で演出し、実際の草花を生けることで任意の土地の風景を象徴した作品に仕上げる。この章では、はじめに提案メディアで用いる霧発生装置の制御方法や、音と光による演出方法について検討を行う、そして、本メディアの展示活動を通じて得られた鑑賞者のフィードバックをまとめ、霞鈴によって呈示される感性情報について考察する。

第5章では、音楽体験における演奏者の存在感の呈示方法について論じる。音楽をはじめとした舞台芸術は、演者と観客の存在感や、両者のインタラクションによって生み出される独特の一体感が一つの価値である。一方で、時間や場所を問わず手軽に音楽を楽しむための様々な技術がこれまでに考案されてきた。こうした音楽情報処理技術は、音楽における音響信号の記録・再現に特化しているものの、演奏者の存在感を呈示することは不十分であった。そうした演者と観客の存在感や一体感を呈示する足がかりとして、身体性に着目したメディアに関する研究が進められており、中でも実際の人間の見た目や動き、質

感を模倣し、人間の存在感を遠隔地へ伝達するロボットが開発されている。音楽演奏を支援するメディアにおいても、実体を持つロボットの動作や質感を利用することで、演奏者による身体表現を観客に呈示できれば、演奏者の存在感が感じられ、より一体感のある音楽体験に繋げられる。そこで本章では、デジタル音楽演奏メディアの利便性と演奏者の存在感を両立することを目指し、“環境に遍在する擬似身体”という概念を導入し、演奏者の存在感を呈示するバーチャルフィンガードラマー「ユビキテル」を提案する。ユビキテルは、実在する人間の指を模したリズム叩打装置であり、ユーザの指によるタップ演奏を記憶し、演奏する。実在する人間の一部である指を元に、人間の肌の質感に近い軟質ウレタン素材を用いることで、まるでその場に演奏者がいるかのような存在感を示す。この章では、はじめに人間の指による叩打音を再現する機構について検討する。そして、試作品の展示活動を通じて得られた体験者のフィードバックをまとめ、ユビキテルによって呈示される演奏者の存在感について考察する。

第6章では、食体験における食感の操作方法について論じる。食体験は五感を全て使う体験の一つであり、クロスモーダル知覚と呼ばれる感覚刺激間の相互作用によって食体験に変化をもたらす。個人差や好みに合わせて適切にコントロールする研究が多数報告されている。中でも、聴覚とのクロスモーダル知覚を食感操作に応用した研究は、音量や周波数特性の操作によるものがこれまで報告されていた。一方、食感のような複数の感覚が相互作用しながら一つの体験として統合されるクロスモーダル知覚において、感覚刺激間のずれも重要な影響を及ぼす要素の一つと考えられる。感覚刺激を人工的に付加する際、付加される刺激とそれ以外の感覚刺激との間にずれが生じれば、統合感の喪失や違和感を引き起こすことが報告されている。一方、感覚刺激間の遅延によって、知覚される咀嚼音に変化が生じるため、クロスモーダル知覚によって有意義な食体験が生み出されることも考えられる。しかし、これまで咀嚼音の遅延フィードバックが食感知覚に及ぼす影響については十分検討されていなかった。そこで本章では、ポテトチップスの咀嚼を遅延させた音に着目し、咀嚼行為とのずれ、および実際に聞こえる咀嚼音とのずれ、それぞれの知覚について調査する。そして、ポテトチップス咀嚼音の遅延フィードバック呈示によるポテトチップスの食感変化の可能性について検討する。具体的には、ポテトチップスの咀嚼時にヘッドホンから遅延咀嚼音を呈示し、触覚や力覚といった聴覚以外の感覚とのずれ、および実際の咀嚼音とのずれが知覚される遅延時間の閾値を調査する。さらに、咀嚼音の遅延フィードバック音を呈示された際のポテトチップスのザクザク感が、遅延がない場合と比

較して向上するかを検証する。

第7章では、感性情報伝達の観点から身体性の意義を示し、結論として全体を総括する。

参考文献

- [1] 井口征士. 感性の情報科学的研究. 計測と制御, Vol. 33, No. 3, pp. 198–203, 1994.
- [2] 椎塚久雄. 感性科学とエンタテインメント (1). 横幹連合コンファレンス予稿集 第3回 横幹連合コンファレンス, p. 60. 横断型基幹科学技術研究団体連合 (横幹連合), 2009.
- [3] 長尾真, 安西祐一郎, 神岡太郎, 橋本周司. マルチメディア情報学の基礎. 岩波講座 マルチメディア情報学, 第1巻, 岩波書店, 1999.
- [4] 田上博司. 情報伝達媒体としてのアート: アートにおける情報伝達モデル化の一手法. 情報文化学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 53–59, 2007.
- [5] 高木佐恵子, 松田憲幸, 曾我真人, 瀧寛和, 志磨隆, 吉本富士市. 初心者のための基礎的鉛筆デッサン学習支援システム. 画像電子学会誌, Vol. 32, No. 4, pp. 386–396, 2003.
- [6] 尾畑貴信, 萩原将文. 感性を反映できるカラーポスター作成支援システム. 情報処理学会論文誌, Vol. 41, No. 3, pp. 701–710, 2000.
- [7] 曾我麻佐子, 海野敏, 安田孝美. クラシックバレエの振付を支援する web ベースのモーションアーカイブと3DCG 振付シミュレーションシステム (データベースシステム)(<特集> コラボレーションアートとネットワークエンターテイメント). 2003.
- [8] 西本一志, 間瀬健二, 中津良平. フレーズと音楽プリミティブの相互関係の可視化による旋律創作支援の試み (<特集> ヒューマンインタフェースとインタラクション). 1999.
- [9] 平田圭二, 青柳龍也. パーピーブ: ジャズ和音を生成する創作支援ツール. 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 3, pp. 633–641, 2001.
- [10] 初音ミク.
<https://ec.crypton.co.jp/pages/prod/vocaloid/cv01> (2017.8.18 閲覧).
- [11] ニコニコ動画.
http://www.nicovideo.jp/video_top (2017.8.18 閲覧).
- [12] ピアプロ.
<http://piapro.jp/> (2017.8.18 閲覧).
- [13] 後藤真孝. CGM の現在と未来: 初音ミク, ニコニコ動画, ピアプロの切り拓いた世界:

1. 初音ミク, ニコニコ動画, ピアプロが切り拓いた CGM 現象. 情報処理, Vol. 53, No. 5, pp. 466–471, 2012.
- [14] Robert A. Wilson and Lucia Foglia. Embodied cognition. In Edward N. Zalta, editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University, spring 2017 edition, 2017.
- [15] Chris L Kleinke, Thomas R Peterson, and Thomas R Rutledge. Effects of self-generated facial expressions on mood. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 74, No. 1, p. 272, 1998.
- [16] Jean-Julien Aucouturier, Petter Johansson, Lars Hall, Rodrigo Segnini, Lolita Mercadié, and Katsumi Watanabe. Covert digital manipulation of vocal emotion alter speakers’ emotional states in a congruent direction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 113, No. 4, pp. 948–953, 2016.
- [17] 嶋崎裕志. ジェームズ・ギブソンの視知覚論と般化. 人文科学論集. 人間情報学科編, Vol. 36, pp. 17–29, 2002.
- [18] Don Norman. *The design of everyday things: Revised and expanded edition*. Basic Books (AZ), 2013.
- [19] Dan O’Sullivan and Tom Igoe. *Physical computing: sensing and controlling the physical world with computers*. Course Technology Press, 2004.
- [20] 館, 佐藤誠, 廣瀬通孝. バーチャルリアリティ学. 日本バーチャルリアリティ学会, 工業調査会, 東京, pp. 156–157, 2010.
- [21] Weiyuan Liu. Natural user interface- next mainstream product user interface. In *Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design (CAIDCD), 2010 IEEE 11th International Conference on*, Vol. 1, pp. 203–205. IEEE, 2010.
- [22] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*, pp. 234–241. ACM, 1997.
- [23] ソリッドレイ研究所. 飛翔体験. DCEXPO2013, 2013.
- [24] Paul Haines, Tetsuaki Baba, and Kumiko Kushiya. Taifūrin: Wind-chime installation as a novel typhoon early warning system. In *Proceedings of the 13th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, p. 24. ACM, 2016.

-
- [25] Christian Geiger, Simon Thiele, Laurid Meyer, Stefan Meyer, Lutz Hören, and Daniel Drochtert. Goin' goblins-iterative design of an entertaining archery experience. In *Advances in Computer Entertainment*, pp. 284–295. Springer, 2013.
- [26] 盛川浩志, 飯野瞳, 金相賢, 河合隆史. シースルー型 HMD を用いた微触感錯覚の呈示と評価 (<特集> クロスモーダル/マルチモーダル). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 2, pp. 151–159, 2013.
- [27] 鳴海拓志, 伴祐樹, 梶波崇, 谷川智洋, 廣瀬通孝. 拡張現実感を利用した食品ボリュームの操作による満腹感の操作. 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 4, pp. 1422–1432, 2013.

第2章

水を扱う道具のシグニファイアを用いた録音・編集作業の円滑化

2.1 はじめに

現在、音楽制作の過程にもコンピュータを使用することが一般的になっている。中でも DAW(Digital Audio Workstation) と呼ばれる音楽制作ソフトを用いた音楽制作の内容は多岐に渡り、様々な作業を実施することが可能となっている。しかし、DAW では複合的な作業ができる反面、作業するためには音楽創作や DAW ソフトウェアに関する専門的な知識が必要であり、専門的知識を持たないクリエイターが音楽を創作する上で障壁となっていた。

そのような障壁をなくし、コンピュータを利用した音楽制作をより円滑にするため、物理的実体を持つオブジェクトを情報操作用インタフェースとして用いる Tangible User Interface(TUI)[1] の概念が注目されている。日常で慣れ親しんでいるオブジェクトを情報操作のためのメタファとして利用した音楽 TUI は、ユーザにとって直感的で分かりやすい情報操作を提供し、直感的な音楽表現が可能なデザイン手法として研究されている [2, 3]。しかし、音楽 TUI は実体のあるオブジェクトを利用することから、特定の情報操作がオブジェクトへの身体動作として強く対応づけられ、目的が一部分に特化したインタフェースとなる傾向がある。特に、楽器音のデジタルデータ（以下、音源）の音情報を編集する TUI に関して数多くの研究が報告されているが [4, 5, 6]、ユーザが自由に音源を追加するためのインタラクション手法については検討されていない。一方、音源の録音を行う TUI[7, 8] も報告されているが、音源を自由に編集するためのインタラクション手法は検討されていない。以上のように、音楽 TUI で実現できる事柄は特定の目的に特化した形になるため、

結果的に生成される音楽は特定のジャンルに偏り、音楽制作の自由度が制限される傾向があった。

本章ではこのような背景から、TUIによる直感的で複合的な音楽制作を実現する試みとして、特に音素材の録音と編集作業に着目し、両作業の直感的操作とシームレスな統合を目的とする。具体的には、ピン、スポイト、ろうとといった道具のシグニファイアによって直感的に水を操作できる体験をモチーフとして、録音・編集作業をシームレスに統合する色水の図形楽譜型メディア「DropNotes」を提案する。水を扱う道具に着目した理由として、これらの操作は多くの身体動作（ろうとを持ってピンに挿入する、スポイトを持って水を吸い上げる等）を伴い、人間はそうした動作を無意識に身につけていることが挙げられる。また、水は日常的に触れる機会が多い慣れ親しんだ物質である。水は特定の形状を持たず、水滴の滴下量に応じて形状を連続的に操作できるため、音情報とのマッピングをする上でのメリットもある。さらに、色水を用いることで視覚的な美に加え、従来の五線譜と比較した自由度の高さと直感性を兼ね備えた図形楽譜としての価値を付加することが期待できる。これにより、専門的な訓練を受けていない人にとっても、音楽という感性情報を円滑に表現しながら、同時に制作者自身が本作品の体験者として、有意義な感性体験を享受できる手段の提供を目指す。

次節以降では関連研究とシステムの詳細について述べ、提案手法の効果を評価した実験の結果について考察する。最後に、今後の課題とまとめを論じる。

2.2 関連研究

2.2.1 ハードウェアシーケンサ

音情報の編集と、音楽の自動再生機能を持つシーケンサとしては、YAMAHA社のTENORI-ON[9]や、KORG社のelectribe[10]などの製品が挙げられる。前者は16×16個のLEDスイッチを操作し、視覚的に音楽を演奏できるインタフェースである。後者は主にダンスミュージックのライブ演奏や楽曲制作に用いられるステップシーケンサである。他にも、PocoPoco[11]は16個のソレノイドユニットが物理的に動作し、「押す」、「掴む」、「回す」という入力で音楽を演奏するステップシーケンサである。

これらの例は、発音時刻や音高などをコントロールするシーケンサとして本章の内容と共通している。一方、本章では従来のボタンやノブといった入力装置ではなく、日常で用

いられるオブジェクトのシグニファイアを有効に利用することにより、直感的で心理的負担の少ない録音・編集手段の実現を目指している。

2.2.2 実体をもつオブジェクトを用いた音楽インタフェース

TUI の概念を応用した録音インタフェースとしては Audio Shaker[7] や The Sound of Touch[8] が挙げられる。前者は円筒型容器に音を吹き込み、容器を振ったり傾けたりするとその動作に合わせて音が再生されるインタフェースで、後者は金属製のヘラ状オブジェクトに音を録音し、様々な材質の平面をなでると平面のテクスチャに応じて音が加工されて再生されるインタフェースである。実体をもつオブジェクトを用いたシンセサイザとしては、Audiopad[2] や ReacTable*[3] が挙げられる。これらはテーブルに特定の機能を持つオブジェクトを配置し、共同で音楽を演奏するためのテーブルトップインタフェースである。また The Table is The Score[4] は図形オブジェクトをテーブル上に配置し音楽を演奏するインタフェースで、BeatBearing[12] と Bubblegum Sequencer[6] はそれぞれ金属球と色のついたゴムボールを並べてドラムループを制作するステップシーケンサである。他にも、子どもの音楽創作意欲を高めるための音楽創作インタフェースである Music Table[5] は、AR マーカが表示されたキューブを並べ、ディスプレイの映像内でキューブ上に現れる生き物の CG を見ながら音楽を創作する。

これらは物理的実体をもつオブジェクトのシグニファイアを有効に利用し、直感的な録音や編集作業を実現している点で本章の内容と共通している。一方で、本章では慣れ親しんだ道具とのインタラクションによって録音・編集作業をシームレスに統合し、より自由度の高い音楽制作を目的としたインタフェースの実現を目指している。

2.2.3 水と音楽をリンクさせたインタフェース

水と音楽をリンクさせた研究としては米澤らのインタラクティブアート Tangible Sound[13] が挙げられる。この作品は蛇口から流れる水を手で遮ったり解放したりして生じる流量の変化を音楽の要素に割り当てている。また Rainterior[14] は水面に落下する水滴に合わせて音と映像が生成される作品である。

これらは水の持つパラメータを音情報操作に割り当てている点で本章の内容と共通しているが、本章では特に録音作業を実現している点でこれらと異なっている。

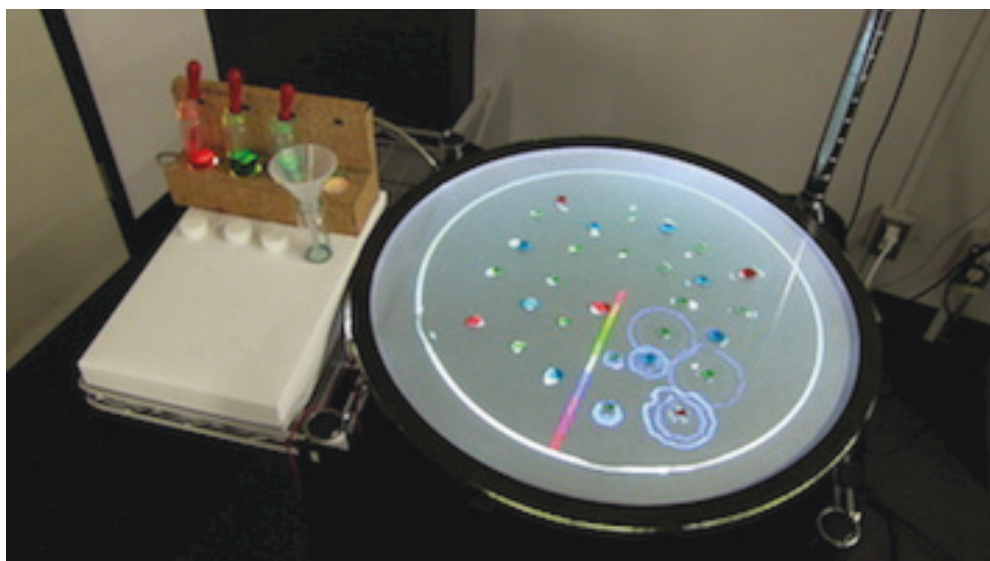


図 2.1 作品「DropNotes」の外観

2.3 DropNotes の提案

2.3.1 概要

本章では色水・ボトル・スポイト・漏斗・テーブルを用いた音源の録音および編集をおこなうインタフェース DropNotes (図 2.1) を提案する。具体的には以下の機能を実装し、統合することを目的とする。

1. 分かりやすく、少ない手順で録音できるサンプラ
2. 分かりやすい操作で音情報を編集できるシーケンサ

なお、ここでは録音された音源を任意の音高・音量に加工し再生する機能を持つものをサンプラと呼び、音情報を編集する機能と、編集された音情報をサンプラへ送信して音楽を自動再生する機能をあわせ持つものをシーケンサと呼ぶ。1. については、まず録音作業を容易にし、さらに録音した音源を編集できる状態へ移行する作業を容易にすることを目指す。2. は、具体的に以下の項目の実現を目的とする。

- a 音楽の大まかなイメージを手早くスケッチできること
- b 自由度の高い音情報を編集できること

a. については、楽曲制作のためのアイデアを手早く具現化し、実際の音として確認しながら音楽を構成するフレーズやリフなどの要素を作りたい（音楽のスケッチ作業）といったニーズを主に想定しており、ユーザが煩雑な操作に悩まされることなく音楽のアイデアを手早く形にできることを目指す。b. については、発音時刻や音高の分解能の制約を減らし、一度の操作で入力できる音情報の自由度を向上させることを目指す。なお、ここでは発音時刻、および音の三要素である音高、音量、音色（本章では特に録音された音源の種類を指す）を編集作業における音情報操作の対象とする。音価は録音された音源に依存するので、ここでは対象としない。また、ここでは音源の音高・音量・発音時刻・音価などの情報を音情報と呼ぶ。

ユーザは色水・ボトル・漏斗・スポイト・テーブルを連携させ、音源の録音およびシーケンサでの編集をおこなう。「ボトルへ漏斗を挿入する」、「スポイトで色水をテーブルに垂らす」などという操作がそれぞれ「録音」、「編集」に対応している。このように慣れ親しんだオブジェクトが各作業のためのメタファとして有効に利用され、両作業において色水が一貫して用いられることで、両作業の直感的な操作と各作業へのシームレスな移行を実現する。なお、本システムはユーザが任意の音を録音できる機能を持つため、ジャンルとしては主にサンプリング音楽を想定しているが、サンプリングされる音源の選択によってはこれ以外のジャンルの音楽制作を妨げるものではない。

録音作業の実現には漏斗・ボトルのシグニファイアを利用する。漏斗には「(容器等に)挿入する」または「流し込む」、ボトルには「入れる」というシグニファイアがあり、音源の録音を分かりやすいメタファで表現する。具体的には、漏斗をボトルに挿入しユーザが音を発すると録音が始まり、漏斗を引き抜くと録音と色水への音源割当てが完了する。

編集作業の実現には色水・スポイト・円形のガラステーブルを用いる。テーブルに滴下された水滴は以下のパラメータを持っており、これらを音情報の表現に利用する（表 2.1）。

- 水滴の色
- 水滴の大きさ
- 水滴の動径 r
- 水滴の偏角 θ

液体は特定の形状を持たず、滴下することにより上記のように様々なパラメータを持たせることができる。また色水ははじめボトルの中で一つのオブジェクトとして存在する

表 2.1 水滴情報と音情報の関係

水滴情報	音情報
色	音源の種類
大きさ	音量
動径	音高
偏角	発音時刻

が、スポイトによって容易に分割、結合が可能である。これらの特徴は録音・編集作業のシームレスな移行や直感的なスケッチ作業に適している。具体的には、様々なパラメータを持つ音情報へ対応づけができること、滴下した水量が水滴の大きさに反映され、音量という物理的な対応関係のあるパラメータに割り当てられるため、音量を直感的に表現でき、音楽を確認しながら音量を変化させ、調整する作業に適していること、スポイトを用いた一滴単位での滴下位置・滴下量制御が可能であること、が挙げられる。

ユーザは音源が割り当てられた色水をスポイトで吸い上げ、テーブルに滴下することで編集をおこなう。一度滴下した水滴を消去するときはスポイトで吸い取るかティッシュ等で拭き取る。

2.3.2 システムの実装

本システムのハードウェアは色水の入ったボトル、ボトルスタンド、漏斗、スポイト、ガラステーブル、Web カメラ、PC、スピーカからなり、ソフトウェアは水滴検出モジュール、録音・音源再生モジュール、プロジェクションマッピングモジュールからなるシステムで、図 2.2 のように構成されている。

サンプラの実装

サンプラは色水、ボトル、漏斗、ボトルスタンド、録音モジュールからなる。録音モジュールにはオーディオ処理フレームワークの Audio Unit を使用し、Mac 用アプリケーションとして実装した。

ボトルスタンドの外観および構造は図 2.3、図 2.4 のとおりである。リードスイッチ、LED を Arduino で制御し、シリアル通信で録音モジュールとデータのやり取りをする。ボトルスタンド自体は4色のボトルまで使用できるようになっているが、そのうち三色を使用している。ボトルには左から順に番号(1, 2, 3)が割り振られており、ボトル番号

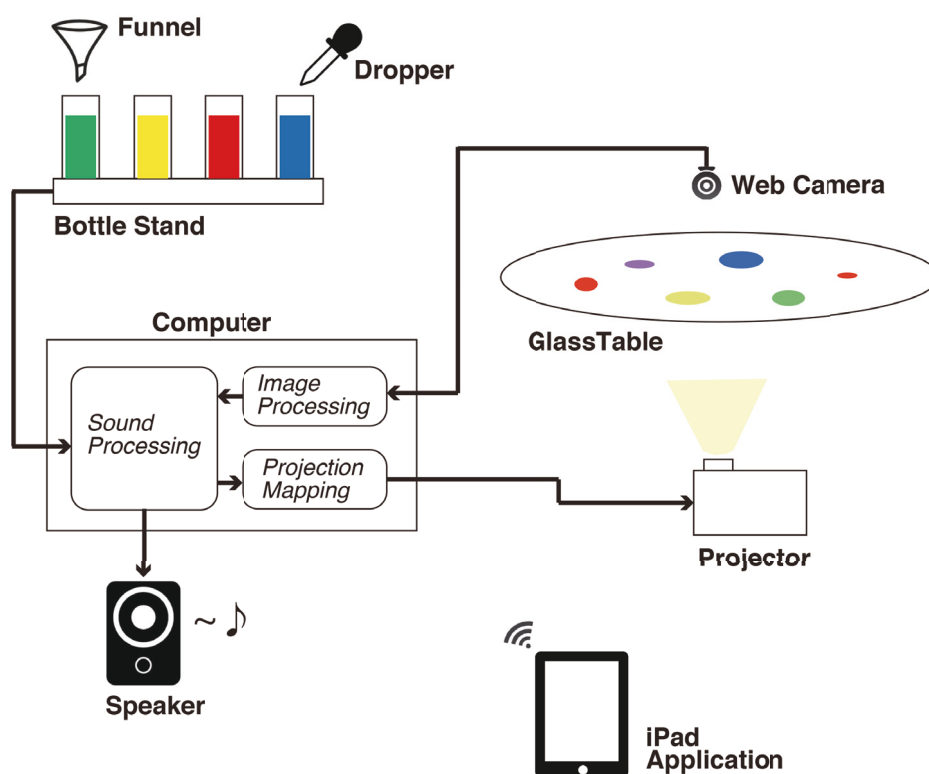


図 2.2 システム構成図

と水の色が赤，緑，青の順で対応している．漏斗がボトルに挿入されると，漏斗に取り付けられた磁石にリードスイッチが反応し，録音開始信号とボトル番号を録音モジュールに送信する．その際，録音状態を示す赤色の LED が点灯する．音はボトルスタンドに内蔵されたマイクを通して録音モジュールに送られる．漏斗がボトルから引き抜かれると，録音終了信号とボトル番号を録音モジュールに送信する．

録音モジュールではボトルスタンドから録音開始信号を受信すると，オーディオファイルを作成し始める．漏斗を入れてから録音したい音を鳴らし始めるまでにタイムラグが生じるケースがあるため，録音終了信号を受信するとオーディオファイル先頭付近の無音部分を検出して削除し，音源再生時にオーディオファイルの先頭から目的の音が発音されるようになっている．また音源ごとに音量のばらつきが出ないようにノーマライズ処理を施した上でオーディオファイルに書き出している．



図 2.3 ボトルスタンドの外観

シーケンサの実装

シーケンサは色水、スポイト、テーブル、プロジェクタ、スピーカ、webカメラ、水滴検出モジュール、音源再生モジュール、プロジェクションマッピングモジュールからなる。水滴検出モジュールでは画像処理用ライブラリの OpenCV を使用し、開発・実行環境として Processing を用いた。また音源再生モジュールには Audio Unit を使用し Mac 用アプリケーションとして実装した。

水滴検出モジュールでは、ガラステーブル上部に取り付けられた Web カメラの映像から水滴を検出し、色、大きさを抽出する。水滴の座標に関しては、水滴位置を示すプロジェクタからの映像が実際の水滴に重なるようカメラ映像内の水滴座標とプロジェクタで投影する水滴座標を対応づける射影変換行列をあらかじめ求めておき、これに基づいて水滴座標を計算する。音源再生モジュールにはこれらの水滴情報を、音楽演奏などの用途に特化した通信プロトコルである OSC (Open Sound Control[15]) で送信している。ユーザが水滴を滴下する際の具体的な処理内容は以下のとおりである。

1. 処理は再生モードと編集モードの2つに分けられる。ユーザの腕がテーブル外縁にかかると編集モードに切り替わり、腕が離れると再生モードとなる。
2. ユーザは編集モード中に水滴を滴下する。編集モード中はユーザが滴下位置を決定しやすいようにガイドが表示される (図 2.5)。

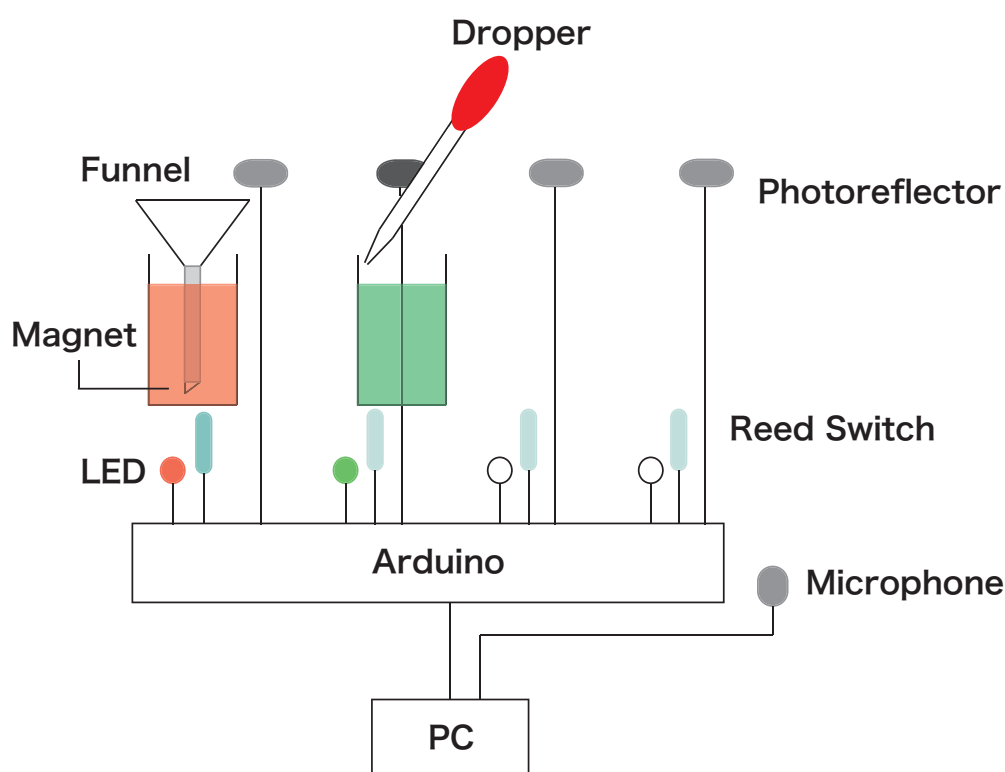


図 2.4 ボトルスタンドの構造

3. 滴下を終えて再生モードに切り替わった際に、新たに滴下された水滴が検出される。
4. 追加された水滴情報が、既に存在する水滴情報とともに定期的に音源再生モジュールへ送信される。

システム処理上、画像処理で検出できる水滴の個数には上限があり、カメラ内に映り込むユーザの状況や環境光の微妙な変化、水滴の大きさ等によってその個数が若干変動する。したがって検出可能な水滴数の上限は概ね 30~40 個程度となる。また検出可能な水滴サイズは 10~400 ピクセル（およそスポイト一滴分の大きさから、1 回で吸い上げられるスポイトの水滴量の大きさ程度）で、このピクセル数から音量が決定される。

本システムではプロジェクタを用いてガラステーブルにアニメーションを投影するため、基本的に暗い部屋での使用が想定される。しかし水滴は個体オブジェクトとは異なり光を透過するため、カメラと光源は水滴を挟んで反対方向になれば検出が困難である。したがってカメラをテーブル上部に設置し、半透明のガラステーブルの周囲を LED で照らすことでテーブル全体を発光させ、細かな水滴も検出できるようにしている。

音源再生モジュールでは水滴検出モジュールから水滴情報を受信し、水滴情報と音情

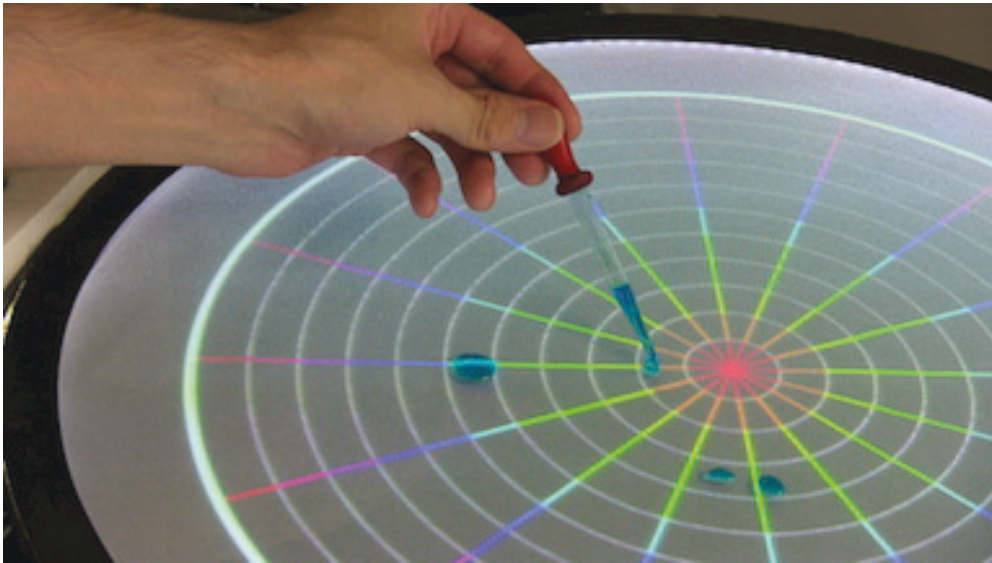


図 2.5 編集モード

報の関係に基づいて音源を再生する(図 2.6)。最終的に各々の水滴が示す音がミックスされ、一定の周期で繰り返しスピーカから出力される。本システムでは音源の長さは元のままで音高のみを変化させるピッチシフトを用いている。

プロジェクションマッピングモジュールでは、音源再生時に水滴の位置に応じたアニメーションを生成し、ガラステーブル上に投影する(図 2.7)。ガラステーブルは2枚の円形ガラスの間にトレーシングペーパーを挟んで映像が投影される仕組みになっている。ガラステーブル上には一定の周期で回転するカラーバーが投影されており、このバーが水滴を通過すると同時に対応する音源が再生され、水滴を中心に波紋が広がるようなアニメーションが生成される。あらかじめ求めてある射影変換行列に基づいて変換された水滴座標に波紋のアニメーションが投影される。

本章ではTUIによる録音・編集作業の実現を目指しているが、より細かな設定を変更する機能の追加を今後の改善として考えており、現段階ではiPadアプリとして実装している(図 2.8)。音源再生モジュールとはWi-Fi(Wireless Fidelity)で通信する。実装した機能は以下のとおりである。

1. 音楽の再生・停止ボタン
2. 全体ボリュームの設定用スライダ
3. ループ周期の変更スロット
4. 音階の種類変更スロット

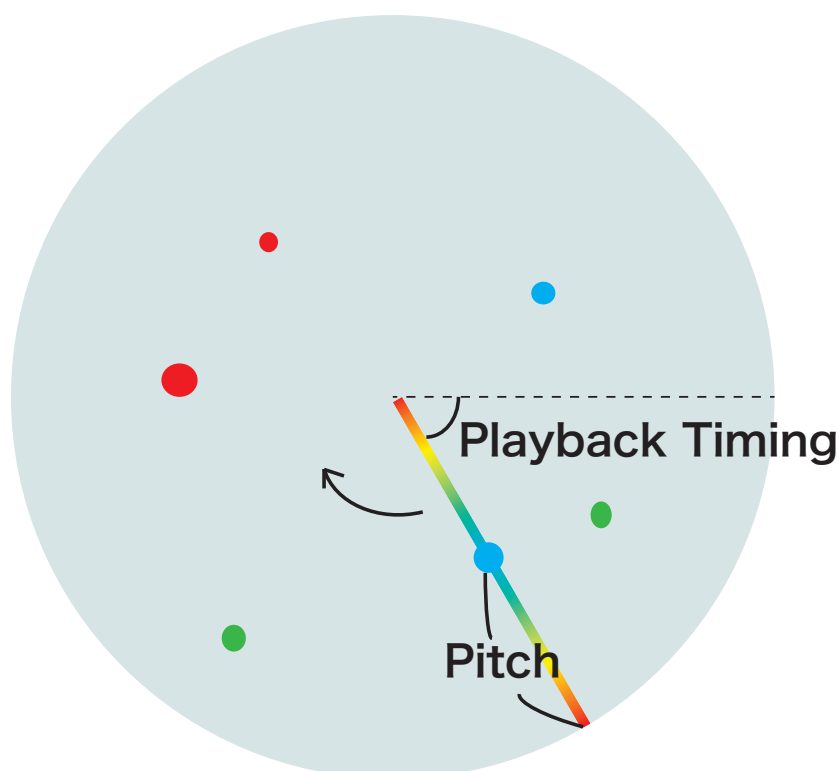


図 2.6 音高と再生タイミング

5. 再生タイミングの補正機能 ON/OFF スイッチ
6. ループ再生 ON/OFF スイッチ
7. 録音した音源の試聴ボタン
8. ボトル内の音源を前回録音した音源に戻すボタン
9. ボトル内の音源を最新の音源に戻すボタン
10. 制作した音楽を改めて録音するバウンス機能

2.4 システム評価

2.4.1 実験の概要

システムの評価を行うため、本システムを用いて実際に録音と編集作業からなる音楽制作をおこなう評価実験を実施した。実験参加者は任意の録音源を用いた音楽制作をおこなった。実際の音楽制作では、まず楽曲制作のためのアイデアを手早く具現化し実際の音として確認しながら1~2小節のフレーズやリフを作るスケッチ作業から、それらを組み合わせることで徐々に楽曲規模を大きくしてゆくことが考えられる。しかし多くの録音

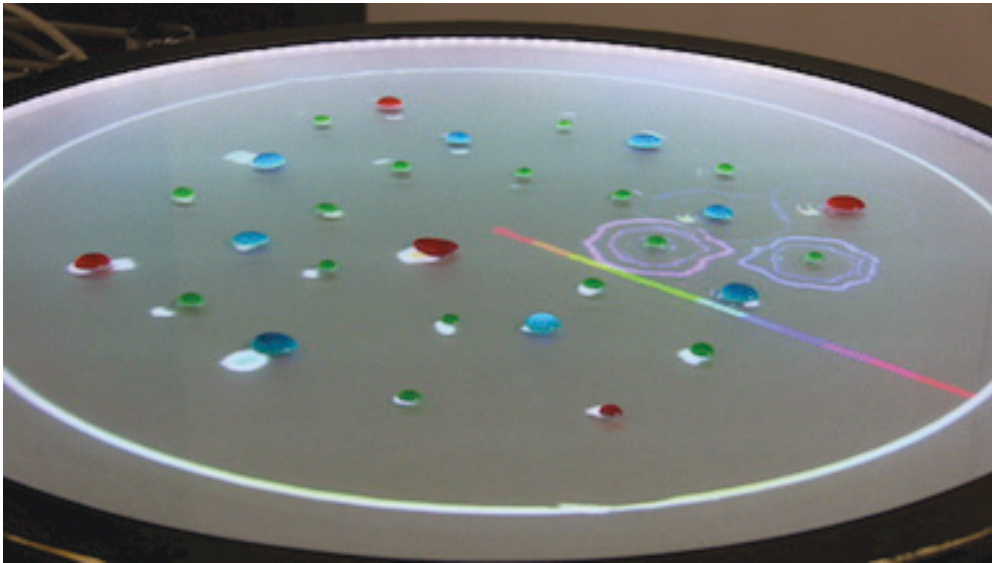


図 2.7 プロジェクションマッピング

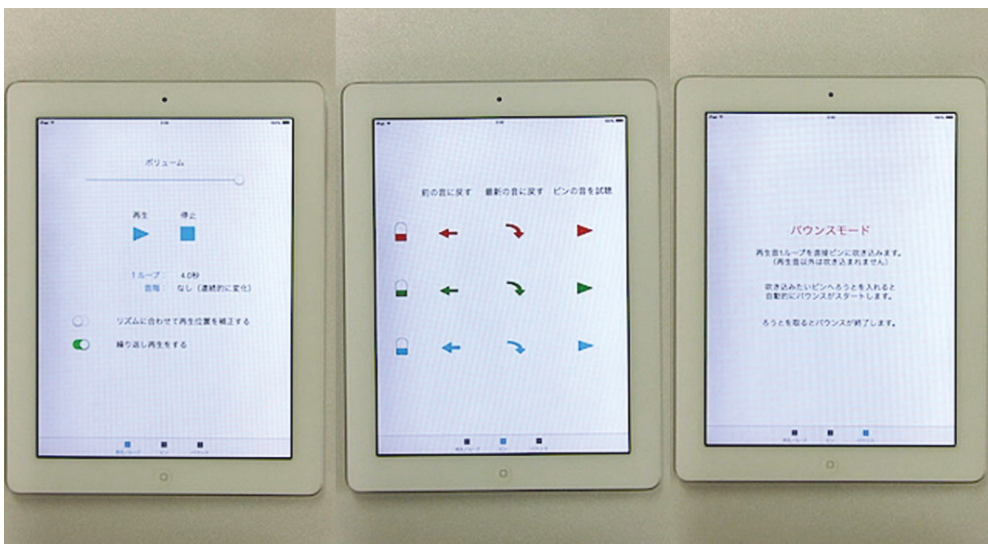


図 2.8 iPad アプリ

源を用い、規模の大きな楽曲を一から制作することは実験上困難なため、今回は3種類の音源の録音と、4秒（BPM120で2小節）のフレーズをスケッチする作業の初期段階を実験対象として想定し、録音作業の様子およびスケッチ作業開始から5分間の様子を調べた。実験参加者は10～20代の大学生11名で、作曲・楽器経験については幅広い層が参加した。具体的には表2.2のとおりである。

本章では(1)操作方法が分かりやすく、少ない手順で録音できるサンプル、(2)音情報を分かりやすく編集できるシーケンサの実現を目指しており、これらの項目に対する提案手

表 2.2 実験参加者の属性

実験参加者	性別	年代	楽器経験	作曲経験
A	女性	10代	○	×
B	男性	10代	×	×
C	男性	20代	○	○
D	女性	10代	○	×
E	女性	10代	○	○
F	男性	20代	×	×
G	女性	10代	○	×
H	男性	20代	×	×
I	男性	20代	○	×
J	男性	20代	×	×
K	男性	20代	○	×

法の効果を上記作業の内容から評価する。(1)の効果は録音およびその音源をサンプルに割り当てのにかかった時間で評価できる。以降、録音をおこない、その音源をサンプルに割り当てる作業をサンプリングと呼ぶ。(2)についてはさらに具体的に(a)音楽の大まかなイメージを手早くスケッチできるシーケンサ、(b)自由度の高い音情報の編集ができるシーケンサの実現を目指している。(a)の効果は、スケッチ作業の初期段階で配置される音数に現れると考えられる。したがって(a)はシーケンサに配置された音数の推移で評価する。(b)に関しては特に音量の入力方法が従来手法と大きく異なることから、シーケンサに配置された音量のばらつきを評価する。また実験参加者には各システム使用後と両システム使用後にユーザビリティに関するインタビューをおこなう。

また DropNotes と比較する対象として、録音ができること、任意の音源を読み込めるサンプルを持っていること、4秒間の音楽の音高・音量・発音時刻を一度に表示できることが満たされており、主に初心者向けに分かりやすく操作できることを設計思想としている。Apple社の GarageBand 6.0.5 (以下 GarageBand) を用いた、また十分な画面サイズで音楽構造を見渡せるよう、iMac (27-inch, Late 2012, Mac OS X Mountain Lion) 上で実験を行った。

2.4.2 実験の流れ

DropNotes と GarageBand を用いて実験参加者は音源のサンプリングと音情報の編集をする。その際、実験参加者の振る舞いを観察し各システムの効果を示す以下の数値を測定する。

- サンプリングにかかった時間
- シーケンサに配置された音数の推移
- シーケンサに配置された音量のばらつき

音源のサンプリングの際に用いる楽器として、電子ピアノ (KAWAI MP5)、鉄琴、鈴、木製打楽器、アナログシンセサイザ (KORG monotron) を用意した。実験参加者はこの中から自由な楽器を使用した。

DropNotes でのサンプリング作業は以下のとおりである。

1. ボトルにあらかじめ入っているスポイトを取り出しておく。
2. ボトルスタンド横の漏斗を手にする。
3. 漏斗を特定のボトルに挿入する。
4. 音を発する。
5. 漏斗を引き抜く。
6. 漏斗をボトルスタンドの横に置く。
7. 取り出しておいたスポイトを元に戻す。

サンプリングされた音源の確認は詳細設定用 iPad アプリを用いる。

編集作業は以下のとおりである。

1. 使用したい音源のボトル内のスポイトを手にする。
2. ボトル内の色水を吸い上げる。
3. スポイト内の色水をガラステーブル上に滴下する。

GarageBand でのサンプリング作業は以下のとおりである。なお、この作業では GarageBand 内で AUSampler と呼ばれるサンプラを用いた。

1. GarageBand メインウィンドウ下部中央付近の録音ボタンをクリックし、録音を開始する。
2. 音を発する。
3. メインウィンドウ下部中央付近の停止ボタンをクリックし、録音を停止する。
4. メニューバー中央付近の「共有」をクリックし、メニューを表示する。
5. 表示されたメニュー内の「曲をディスクに書き出し…」をクリックする。
6. 表示されたウィンドウの「書き出し」ボタンをクリックする。
7. 新たに表示されるウィンドウ上部に任意のファイル名を入力する。
8. 同ウィンドウ右下の「保存」ボタンをクリック。音源のファイルが作成される。
9. メインウィンドウ右の「AUSampler」アイコンをクリックし、AUSampler ウィンドウを表示させる。
10. AUSampler ウィンドウ左下「エディタを表示」横の三角アイコンをクリックし、ファイル読み込みの領域を開く。
11. 表示された領域左側の「Sine 440 Built-in」（デフォルト音源）をクリックする。
12. AUSampler ウィンドウ左下の「+」アイコンをクリックし、録音ファイルを追加する。
13. 表示されたウィンドウ内に表示されているファイルから、7. で入力した名前のファイルをクリック。
14. 同ウィンドウ右下の「開く」ボタンクリックでファイルが読み込まれる。
15. AUSampler ウィンドウ左に表示されているファイルから7. で入力した名前のファイルをクリック。
16. 同ウィンドウ左に表示されたファイルから「Sine 440 Built-in」をクリックすると「Sine 440 Built-in」を消去できるようになる。
17. 同ウィンドウ左下の「-」アイコンをクリックで「Sine 440 Built-in」を消去。

編集作業は以下のとおりである。

1. 使用したい音源のトラックをクリック。
2. 表示された編集画面（以下ピアノロール）内をクリックして音情報を表すバー（以下ノート）を入力する。
3. ノートの音量を変更する場合は、入力したノートをクリックし、ピアノロール左側

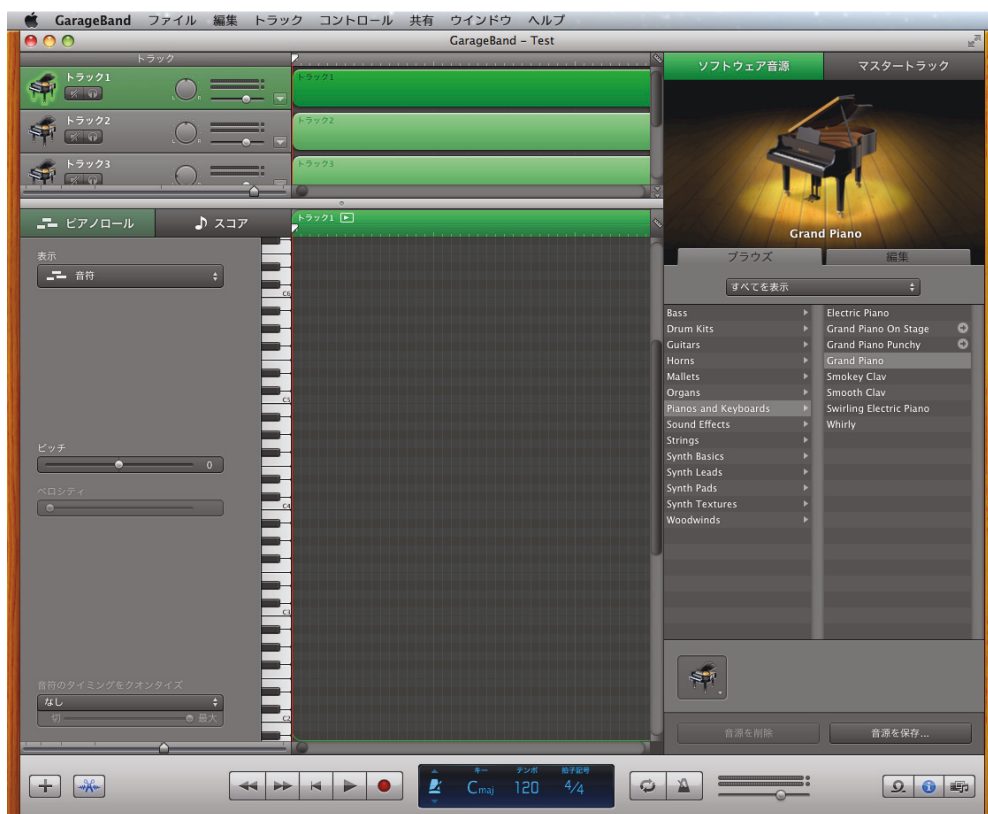


図 2.9 GarageBand ウィンドウの例

に表示されたスライダをドラッグする。

4. 音価を変更する場合は、入力したノート右側をドラッグする。

なお GarageBand での音量とはピアノロールに配置されたノートのベロシティを指すこととする。上記の作業と関わるマウスの移動距離に関して、実際にマウスを持つ手の動きの大きさと画面上のカーソルの動きの大きさと正確に対応ができないこと、実験参加者が常に最短距離でカーソルを動かすとは限らないことから、画面上のピクセル値ではなく、動作に焦点を当てて記述した。

各システムに対しておこなう実験の内容は下記のとおりである。なお実験は A グループと B グループに分けておこない、A グループは先に使用するシステムを DropNotes、B グループは GarageBand とする。

- はじめにサンプリング方法について教示する。
- 実験参加者に「こちらが『始めてください』と合図をしたら、3種類の異なる音源のサンプリングをし、サンプリングされた音源の確認をした後に『終わりました』と



図 2.10 AUsampler ウィンドウの例

報告して下さい」と指示する。

- サンプリング作業終了後，編集方法について教示する。
- 実験参加者に「こちらが『始めてください』と合図をしたら，サンプリングした3種類の音源を用いて5分間で4秒のループ音楽を制作して下さい」と指示する。
- 5分経過した後，使用システムのユーザビリティに関するインタビューをおこなう。

さらに，両システム試行後，両者を比較したユーザビリティに関するインタビューをおこなう。

2.4.3 結果と考察

サンプリングにかかった時間

実験者の「始めてください」という合図から，実験参加者の「終わりました」という合図までをサンプリング時間とし，この平均値と標準誤差を求めた結果を図 2.11 に示す。得ら

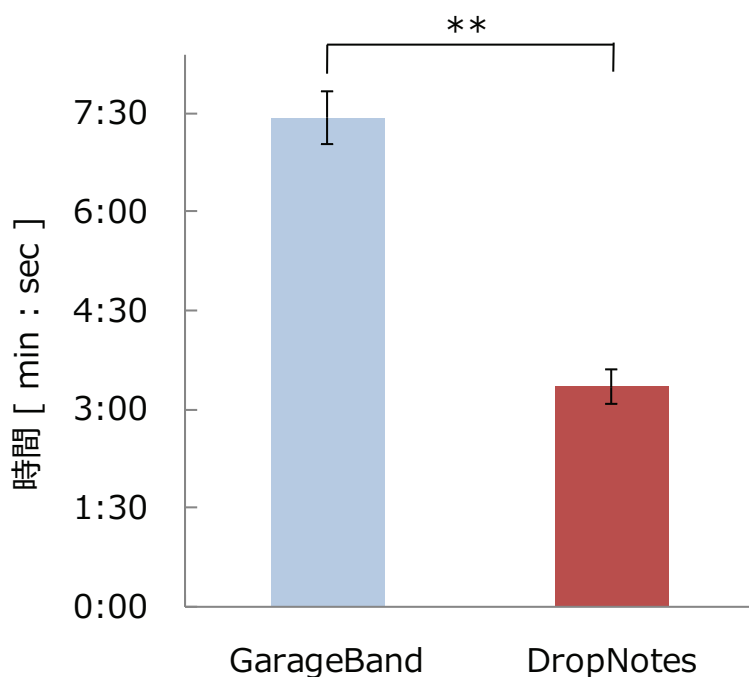


図 2.11 サンプルング時間

れたデータに対して t 検定をおこなったところ、サンプルング平均時間には有意水準 1% で有意差があることが確認された。このことから DropNotes の方が Garageband に比べてサンプルングが速くおこなわれていたことが分かる。また GarageBand のサンプルングは手元のマウス操作で完結する反面、煩雑なステップを伴うのに対し、DropNotes は腕を動かしてスポイト、漏斗の出し入れ操作を行うにもかかわらず、手順自体は単純なためサンプルング時間が短くなっていると考えられる。

シーケンサに配置された音数の推移

実験者の「始めてください」という合図から 1 分毎にシーケンサに配置された音数を計測し、平均値を求めた結果を図 2.12 に示す。ただし、DropNotes に関してはシステム処理の都合上、ユーザがテーブル内に腕を入れている状態では水滴の検出をおこなわないうえ、状況によって水滴数の上限が 30~40 個程度の範囲で変動するために水滴の検出漏れが起こりうる。したがって 1 分毎の各時点では、システムで検出した水滴の数ではなく実際に実験参加者が配置した水滴数をカウントした。

得られたデータに対して、1~5 分経過時の 5 水準からなる時間要因と DropNotes,

GarageBand の 2 水準からなるシステム要因の二元配置分散分析をおこなった。その結果、時間要因の主効果に加え時間要因とシステム要因との間の交互作用がそれぞれ有意水準 5% で認められた。さらにこの 2 要因の交互作用における下位検定をおこなったところ、時間要因のうち 1~3 分経過時の 3 水準におけるシステム要因の単純主効果が有意水準 5% で認められた。すなわち DropNotes, GarageBand とともに音数が上昇する傾向が見られ、1~3 分経過時では GarageBand に比べ、DropNotes の方が多くの音を配置していた。このことに加えて実験参加者の音楽制作時の振る舞いの観察から音楽制作過程に明確な違いがあったといえる。すなわち実験参加者は音数を増やしながら音楽を制作してゆくが、DropNotes では 1~3 分経過時で GarageBand に比べ多くの音を配置し、3 分を過ぎた辺りから音楽をしばらく聴いていたり音の配置を変更するなどの作業に移行しはじめている。一方 GarageBand では 1~3 分経過時から一度配置した音の消去や、音高・音価の変更を繰り返しながら音を配置している。

一方、音楽制作開始から 4 分経過時および 5 分経過時でシステム要因に単純主効果が認められなかった要因としては先述の音楽の確認段階への移行のほかにも、DropNotes のテーブルに水滴を滴下するスペースがなくなっていくことが挙げられる。このことから、1~3 分の初期において DropNotes の方が、GarageBand に比べて速くスケッチ作業を進めていることが考えられる。

シーケンサに入力された音量のばらつき

実験参加者全ての、5 分経過時点でシーケンサに入力されている音の音量を 0.0~1.0 の範囲に変換 (0 ピクセル = 0.0, 400 ピクセル = 1.0) し、0.1 刻みのヒストグラムで表したものが図 2.13 である。この結果から GarageBand に比べて DropNotes は様々な音量の音が配置されていることが分かる。一方、GarageBand ではマウスで音高と発音時刻を指定したあとに画面左に表示されるスライダを動かして音量を変更するしくみになっているが、11 名中 6 名は全く音量を調整せず全てデフォルトの音量のままにしていた。このことに関して、音高・発音時刻・音価はノートを実際に動かすことで変更できるパラメータであるのに対し、音量はノートとは異なる場所でしかコントロールできないことが要因のひとつと考えられる。

また、スポイトによる水滴サイズの制御の難しさに関して検証を行った。実験参加者はシステム評価実験とは別の、10~20 代の大学生 10 名とした。具体的には、一般的に MIDI

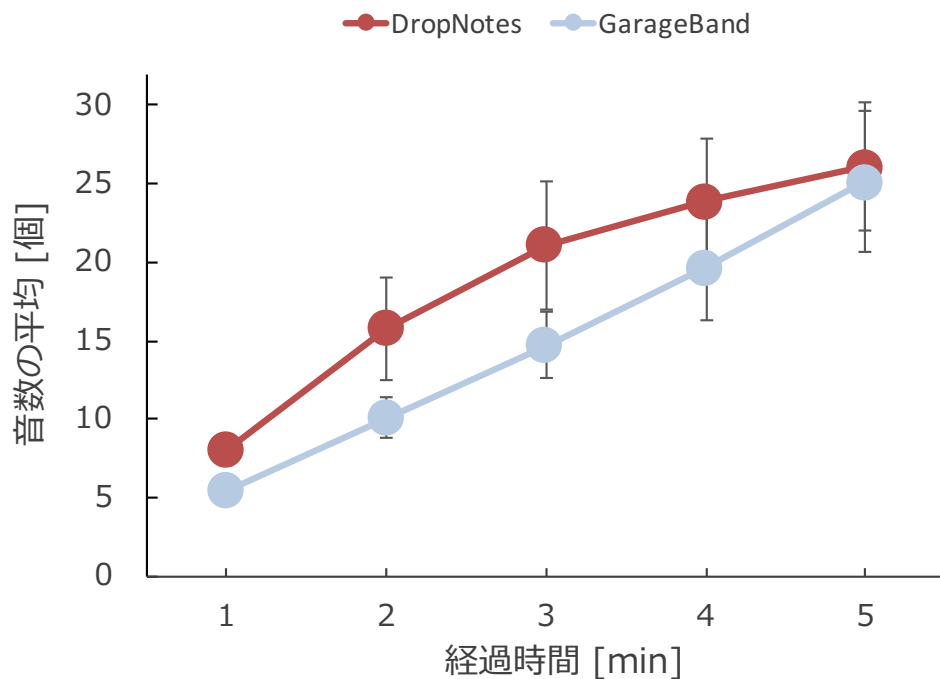


図 2.12 音数の推移

でも用いられる音楽の強弱記号 (*ppp*~*fff*) が 8 段階であることを踏まえ、さらに細かい 10 段階の音量調節が可能であるか検証した。検証方法は以下のとおりである。

1. OHP シートに印刷された、水滴に見立てた赤い円（以下、円とする）を 10 種類用意する。
2. 円の最大サイズはシステムが検出した際におよそ 0.95 (0.0~1.0) になる 4.42cm^2 とし、面積が 10 段階に比例するように他の円のサイズを決定する。
3. 10 個の円を DropNotes のテーブル中央にひとつずつランダムに呈示し、実験参加者に「なるべく同じ大きさになるよう水滴を滴下して下さい。」と指示する。実験参加者は赤色の水滴を滴下する。実験参加者の立ち位置や滴下中の微調整、滴下位置は実験参加者の自由とする。
4. 滴下が終了したら次の円を呈示し、10 個すべてに関して同様の作業を行う。

円のピクセルと実験参加者の滴下した水滴のピクセル誤差を 0.0~1.0 の範囲に変換（0 ピクセル = 0.0, 400 ピクセル = 1.0）した数値（以下、音量誤差）を集計した結果が表 2.3 である。この結果、音量誤差を正規分布と仮定すると、1~9 番目で信頼水準 95% で 10 段階

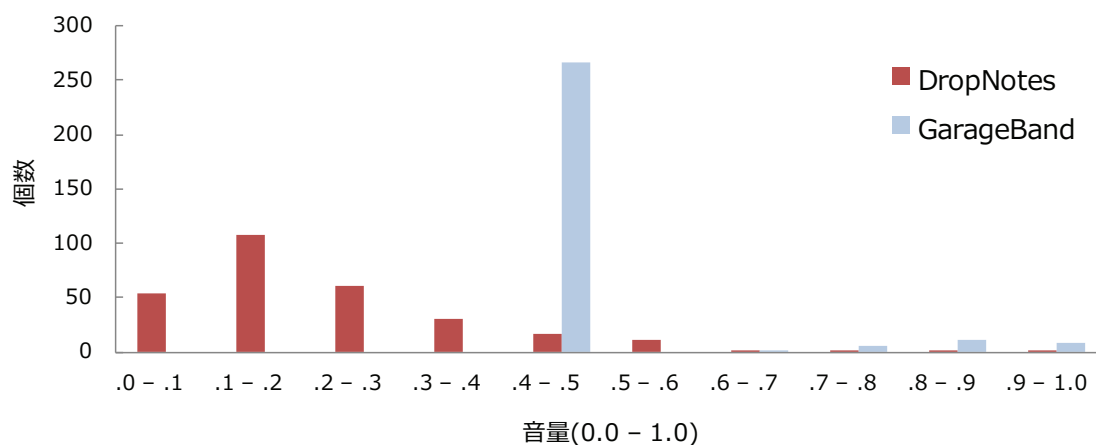


図 2.13 音量ヒストグラム

表 2.3 水滴と円の音量誤差

サイズ	誤差の平均	標準偏差	95% 信頼区間の幅
1	-0.00925	0.0137	0.0170
2	-0.0225	0.0226	0.0280
3	-0.01825	0.0380	0.0472
4	-0.02125	0.0400	0.0496
5	-0.044	0.0586	0.0726
6	-0.04125	0.0342	0.0423
7	-0.07275	0.0524	0.0649
8	-0.03175	0.0647	0.0802
9	-0.08075	0.0686	0.0851
10	-0.0245	0.0819	0.1015

の幅 (0.1) におさまっており、比較的大きいサイズの水滴まで十分制御できている。特に、先の実験において多く分布していた 0.0~0.6 付近の水滴に関しては十分制御できていたことが言える。しかし水滴のサイズが大きくなるに従って標準偏差が増加しており、水滴のサイズのピクセル値と音量との対応づけを検討する必要がある。

以上のことから、評価実験での音量は十分コントロールできていたと考えられ、DropNotes では、音量変化をより容易に入力できたといえる。

インタビュー

実験の中で以下の質問をおこなった。

- 各システム試行後
 - － システムを使用してみてどうでしたか。
 - － 予想と違ったことはありましたか。
 - － 予想どおりにいったことはありましたか。
- 両システム試行後
 - － サンプリングに関して両者を比較してどう思いましたか。
 - － シーケンサへの入力に関して両者を比較してどう思いましたか。
 - － シーケンサの表示のしかたに関して両者を比較してどう思いましたか。

上記の質問から DropNotes, GarageBand に関して特に目立った回答から、内容的に類似するものを以下にまとめた。カッコ内に回答が得られた延べ人数と、実験参加者にラベリングしたアルファベットを示す。

- DropNotes
 1. 音楽制作に関して
 - － 深く考えなくても音楽を作ることができた (4名, A, B, C, I)
 - － 偶然生まれる予想外の音楽を作ることができた (2名, F, K)
 2. サンプリングに関して
 - － 分かりやすい (7名, A, B, D, E, G, H, K)
 - － 初心者には楽しい (2名, F, H)
 3. シーケンサへの入力に関して
 - － 絵や図形を描くように配置できた (3名, B, H, I)
 - － 水滴を混ぜられるようにした方が良い (4名, C, E, G, J)
 - － 水滴が反映されるまで音を確認できない (2名, C, D)
 - － 直感的, 単純, 分かりやすかった (3名, C, H, I)
 - － 音量を操作しやすい (4名, B, F, H, J)
 - － 音価を変更できない (2名, F, I)
 4. シーケンサの表示に関して
 - － 見た目がきれい (4名, C, D, E, G)
 - － 3種類の音源がどのように配置されているかを一目で見渡せるのが分かりやすい (5名, A, B, C, D, H)

- 音楽がループしているのが分かりやすい (3名, B, H, I)

- GarageBand

1. 音楽制作に関して

- 5分では全然作業が進まなかった (3名, G, H, I)

2. サンプリングに関して

- 難しかった (3名, A, D, E)

3. シーケンサへの入力に関して

- 移動と消去がやりやすい (3名, F, G, H)
- 入力の際に音が鳴るのが分かりやすい (4名, A, C, E, G)
- 細かく音楽を作り込むのに適している (6名, C, E, H, I, J, K)

4. シーケンサの表示に関して

- 音高がわかりやすい (3名, C, F, G)

上記の回答から DropNotes では、ユーザの音楽経験に関わらず、簡単に分かりやすく音楽制作ができたということを示唆する意見が複数聞かれた。一方、細かく音楽を作り込むには GarageBand の方が適しているという意見もあった。つまり DropNotes は直感的に手早く音楽を制作でき、GarageBand は時間をかけることで細かな音楽を制作できるという両者の違いがこれらの意見に表れている。

2.4.4 今後の課題

実験を通して提案手法の効果が示された一方で、実験参加者からいくつか問題点の指摘があった。最も多かったのは水滴を混ぜることができない点である。現状では水滴の色で音源を識別しているため、色が混ざると正しく音源を識別できない。水滴を混ぜると音も混ざって聴こえるなどの機能の追加と、その手法についての検討が必要である。

また水滴を滴下してからそれが反映されるのに腕を抜かなければならない点についても指摘があった。現状ではカメラをテーブル上部に設置しており、ユーザが腕を入れると水滴が隠れてしまうためにこのような方式を採用している。リアルタイムで水滴を検出するためにカメラをテーブル下部に取り付ければ水滴は隠れないが、その場合でも編集モード中の滴下位置を示すガイドが水滴の誤検出を引き起こしてしまう問題がある。カメラ位置や滴下位置ガイドの投影方法など、改めて検討が必要である。

その他、本システムの評価実験としてスケッチ作業を想定し、ごく初期段階である5分間にのみ焦点を当てたが、本システムを用いて規模の大きな楽曲制作までカバーできるか検討が必要である。

2.5 おわりに

本章ではビン、スポイト、ろうとといった道具の持つシグニファイアによって直感的に水を操作できる体験に着目し、感性情報の表現行為として音楽創作へと応用した色水の図形楽譜型メディア「DropNotes」を提案した。提案システムの評価実験より、DropNotesでは水を扱う道具のシグニファイアが有効に作用し、スムーズに録音・編集作業を実施することが可能であった。この結果から、慣れ親しんだ身体動作は音楽情報の操作における認知的負担を軽減し、より簡単に音楽を表現できることを示した。

今後の課題としては、色水を混ぜる動作の実現やユーザが水滴を滴下すると同時に水滴を検出する手法についての検討が挙げられる。また本システムの評価実験ではスケッチ作業のごく初期段階にのみ焦点を当てたが、本システムを用いて規模の大きな楽曲制作までカバーできるかについても検討していきたい。

参考文献

- [1] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*, pp. 234–241. ACM, 1997.
- [2] James Patten, Ben Recht, and Hiroshi Ishii. Audiopad: a tag-based interface for musical performance. In *Proceedings of the 2002 conference on New interfaces for musical expression*, pp. 1–6. National University of Singapore, 2002.
- [3] S Kaltenbrunner Jordà and M Geiger. G. and bencina, r. the reactable*. In *Proceedings of the International Computer Music Conference*, pp. 579–582, 2005.
- [4] Golan Levin. The table is the score: An augmented-reality interface for real-time, tangible, spectrographic performance. In *ICMC*, 2006.
- [5] 牧野真緒, 大島千佳, 樋川直人, 西本一志, 鈴木雅実, 萩田紀博. 子どもの音楽創作意欲を高めるための「音に触って聞く」作曲システムの提案 (<特集> エンタテインメン

- トコンピューティング). 知能と情報, Vol. 17, No. 2, pp. 164–174, 2005.
- [6] Hannes Hesse, Andrew McDiarmid, and Rosie Han. The bubblegum sequencer. In *Proceedings of the Conference on Computer Human Interaction (CHI)*, 2008.
- [7] Andy Cameron and Systems Design Limited. *The Art of Experimental Interaction Design*. Gingko Press, 2005.
- [8] David Merrill and Hayes Raffle. The sound of touch. In *CHI'07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2807–2812. ACM, 2007.
- [9] Tenori-on. <http://jp.yamaha.com/products/musical-instruments/entertainment/tenori-on/> (2014.12 閲覧).
- [10] electribe. <http://www.korg.com/jp/products/dj/electribe/> (2014.12 閲覧).
- [11] 金井隆晴, 菊川裕也, 鈴木龍彦, 馬場哲晃, 串山久美子. PocoPoco: 実物体の動きを利用した楽器演奏インタフェース. 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 3, pp. 1050–1060, 2012.
- [12] Peter Bennett, SileO' Modhrain. The beatbearing: a tangible rhythm sequencer. In *Proc. of NordiCHI*, 第 2008 巻, 2008.
- [13] 米澤朋子, 安村通晃. 流体による音表現 インスタレーション Tangible Sound より. 日本バーチャルリアリティ学会第 4 回大会論文集, pp177-180, 1999.
- [14] Erika Okude and Yasuaki Kakehi. Rainterior: An interactive water display with illuminating raindrops. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 270–271. ACM, 2011.
- [15] Matthew Wright and Adrian Freed. Open SoundControl: A New Protocol for Communicating with Sound Synthesizers. In *ICMC*, 1997.

第3章

日用品のシグニファイアと感性的特徴を用いたアート作品創作の円滑化

3.1 はじめに

鑑賞者が作品に触れたり動かすなどの対話をモチーフとしたアート作品やエンタテインメントシステムが、デジタル情報処理技術の発展とともに魅力的な体験を鑑賞者に与えている。その例として、Ishiiらによる Music Bottles[1] は、3つのガラス製ボトルの蓋を開けると、それぞれのボトルに対応する音楽が再生される作品であり、音楽という情報の存在感をボトルのメタファで表現している。他にも Hauenstein らによる Audio Shaker[2] は、容器を振ったり傾けたりといった動作に呼応して、円筒状容器に吹き込まれている声が再生される作品であり、円筒状容器の持つシグニファイアを音情報の操作と対応づけている。このように、作品に用いられるモチーフやインタラクションには、様々なイメージや印象、意味といった感性的特徴を持っており、これらを自由な発想で解釈することによって新たな視点を鑑賞者に与え、多様で興味深いアート体験を生み出している。

このようなインタラクティブアートや、電子玩具、電子楽器などの作品やシステムを創作する際、システムのインタラクションデザインが必須となる。つまり、ユーザに対してどのような体験を提供するかを明確にし、それに沿ったインタフェースの設計が行われる。インタフェースの設計においては適切なシグニファイアを用いて、ユーザにとって負担の少ないインタフェースを設計することが求められる [3]。また、アート作品においては、作品のインタフェースそのものが持つ感性的特徴が活かされることがしばしばある。先述の Music Bottles の他にも、Daniel Rozin による、835枚の木製タイルを上下に傾けることで光の濃淡を表し、目の前に立つ鑑賞者の姿を映し出す作品「木製の鏡」[4]などがそ

の一例である。これらの作品では、ガラスや木がそれぞれ持つ、透明感や温もりといった感性的特徴が作品の中に生かされている。しかし、適切なシグニファイアや特定の感性的特徴を持つインタフェースを一からデザインし制作するのは、専門的な技術や知識がなければ困難である。一方で、身の回りにはすでに多様なシグニファイアや感性的特徴を持つ人工物が数多く存在する。こうした人工物の持つシグニファイアや感性的特徴を柔軟に再利用、再構成できれば、インタラクティブな表現を創出する際に役立てられる。

そこで本章では、IoT (Internet of Things) と呼ばれる情報通信インフラが浸透した生活環境を想定し、日用品で様々な音素材を奏でるアート作品創作メディア「MITAI」を提案する。さらに、本メディアを通じ、日用品のシグニファイアと感性的特徴の再利用によって印象的なアート体験を創出可能であるかを検証する。IoT技術は近年、SNSなどのWebサービスと温度計やライト、スマートウォッチといった日常のモノをインターネットで連携させ、ユーザ自身がライフスタイルに合ったサービスを組み立てられるようになっており [5]、ますます生活環境に浸透しつつある。あらゆるモノの状態を手軽に取得・制御できるインフラが整えば、単に暮らしを便利にするだけでなく、インタラクティブな作品創作のハードルを下げ、誰もが創作活動に参加できる環境の実現に貢献できる。本章では、インタラクティブな作品として、日用品への行為に対し音素材を割り当て、加工・再生するサウンドアートや電子楽器といったジャンルの作品創作を想定する。日用品としては引き出し、ライト、扇風機、コーヒーミル、スピーカを用意し、サウンドアート作品の創作に必要な機能として音源再生やエフェクト処理をおこなう機能をタブレット端末を用いて日用品とつなぎ合わせ、ひとつの作品を構築することができる。

MITAIは身の回りの日用品をインタラクティブな作品制作のモチーフとして柔軟に再利用、再構成できることに加え、ユーザの“してみたい”という自由な発想を促進すること、ひいては多様で“未体験”のアート作品に触れられることを意図している。MITAIの制作を通して、あらゆるモノがインタラクティブ作品のモチーフとして柔軟に再利用される可能性を持ち、多様で興味深いアート体験の創出を促す基盤の実現を目指す。以降、関連研究と作品の技術的詳細について述べ、いくつかの日用品と音素材を用意したアプリケーション例を示す。その後、本作品によって実際に創出された体験の価値や今後の課題に関して考察する。



図 3.1 作品「MITAI」の外観

3.2 関連研究

Web サービスと日用品を連携させ、ユーザ自身がライフスタイルに合ったサービスを組み立てられるサービスとして、IFTTT[6] や myThings[7] などが挙げられる。他にも、身近なモノのネットワーク化において、橋岡らは住宅内の機器やサービスを 1 対 1 だけでなく複数対応づけるためのビジュアルプログラミング環境を提案している [8]。このように IoT 技術は今後ますます身近になると考えられ、多様なニーズに対してユーザ自身が簡単にモノ同士の振る舞いを作成できるサービスが重要になっている。

また、日用品をサウンドアートやエンタテインメント作品に応用した作品も数多く発表されている。こうした作品例として、先述の Music Bottles[1] や Audio Shaker[2] に加え、Hesseらによる Bubblegum Sequencer[9] や、奥出らによる Rainterior[10] などが挙げられる。前者はゴムボールを用いたミュージックシーケンサであり、後者は水面に落下する水滴に合わせて音と映像が生成される作品である。この他にも非常に多くの作品が創作されており、日用品を自由な発想で作品のモチーフに取り入れることで、斬新なアート体験を創出している。

このように、モノの状態をセンシングし、適切な方法で制御することによって様々な作品が制作されている。しかし、作品を制作するにはモノの状態取得・制御に関する専門的な知識や試行錯誤が必要となる。IoT社会が発展し、様々なモノの状態取得・制御機能を持ったネットワーク上のサービスが整えば、ユーザはこうした技術に関知しなくとも作品アイデアを実現できる。こうした背景から本章では、ユーザ自身が人工物の持つシグニファイアや感性的特徴を柔軟に再利用、再構成し、新たなインタラクティブアート作品を創出するためのシステム実現を試みる。

さらに、コンピュータが生まれた当初からシンセサイザやエフェクタといったモジュールをコンピュータ上で実現し、音響処理を施すことで音楽を生成する試みも盛んにおこなわれてきた。こうした試みの中で、音楽作品の創作に用いられるモジュールをわかりやすく連結させるためのシステムが盛んに開発されており、こうしたシステムの例としてMax[11]や、Audiopad[12]、ReacTable*[13]などが挙げられる。Maxはコンピュータ上で音響合成をおこなうビジュアルプログラミング言語であり、Audiopad、Reactableはテーブルに特定の機能を持つオブジェクトを配置し、オブジェクト同士を近接させたり、移動・回転させることで入出力をおこなう音楽演奏用タンジブルインタフェースである。

このように、モジュール同士を連結させ、音響処理を施す作品や機能を構築するための様々なシステムが提案されており、モジュールを直感的に表示して連結させることが可能となっている。これらの研究を応用し、身の回りのモノの持つ情報を音響合成などのモジュールと組み合わせ、多様なアート体験を創出するシステムを構築することが目的である。

3.3 MITAI の提案

3.3.1 システムの概要

本節ではIoTのインフラが浸透した生活環境を想定し、すでに身の回りに置かれている人工物の持つシグニファイアや感性的特徴を柔軟に再利用、再構成することで得られる多様なアート体験を創出することを目的としたサウンドアート創作メディア「MITAI」を提案する。本システムは日用品と、作品創作に必要な機能として音源再生やエフェクト処理をおこなう「サービス」をネットワーク上でつなぎ合わせてひとつの作品を手軽に構築するシステムである。

本システムでは LAN 上において、音源やエフェクトは「サービス」として存在する。また、日用品も同様に LAN 上では「サービス」として存在し、モノの状態取得・制御ができるようになっている。日用品の状態取得・制御に関する部分はセンサや通信など異なる技術が用いられ、専門的な知識を要するが「サービス」としてカプセル化されることによりユーザは日用品を用いた作品の制作に専念できる。なお、本章ではネットワーク上に設置された特定の単一処理をおこなう機能をサービスと呼ぶ。

本システムでは日用品として、引き出し、ライト、扇風機、コーヒーミル、スピーカそれぞれの状態取得・制御を取り持つ LAN 上のサービスを用意した。また、音楽作品を構築する上での基本サービスとして、音源（キラキラ星、風鈴、明るい曲調のループ BGM、電子音）、ローパスフィルタ、リングモジュレータのサービスを用意している。これらは日用品と異なり、実体を持たないソフトウェア上のサービスである。

3.3.2 システム構成

システム構成は図 3.2 のとおりである。モノは LAN 上のサービスという形で抽象化され、タブレット端末上で自由に閲覧できる。タブレット端末には Apple 社 iPad 2 を用いた。さらにタブレット端末上のネットワーク構築アプリケーションから上記サービスを選択し、ノードで表現されたこれらのサービスをつなぎ合わせることで、自由に作品を構築する。これらのサービスは、実際にはコンピュータ上のプログラムとして動作している。コンピュータには Apple 社 Macbook Air を用いており、Arduino[14] と呼ばれるマイコンと、XBee[15] と呼ばれる無線通信モジュールの親機が接続されている。そして引き出し、ライト、扇風機は Arduino と接続されており、引き出しの開き具合やライト・扇風機についているノブ状態の取得、およびライトの光量、扇風機の風量制御をおこなう。またコーヒーミルは内部に組み込まれた電子回路によってミルの回転状態を取得し、XBee の子機からコンピュータに送信される。各サービスは、実際にはこれらのハードウェアを通して状態取得・制御をおこなう。このように、モノの状態取得・制御に関する部分は各々異なる技術が用いられることが想定されるが、サービスとしてカプセル化されることにより、ユーザはこうした処理に関知する必要がなくなっている。また、現状のシステムではサービスを提供する通信端末を各々のモノの内部に組み込むことが困難なため、全てのサービスは同一のコンピュータ上で動作している。通信端末の小型化により、各々のモノが独立して通信可能であると考えられる。

全てのサービスおよびネットワーク構築アプリケーションは、音楽演奏などの用途に特化した通信プロトコルである OSC (Open Sound Control[16]) で通信をおこなう。タブレット端末上で利用可能なサービスを提示するための情報や、サービス同士を連結させるための通信には信頼性が求められるため、TCP (Transmission Control Protocol) ベースの OSC を用いている。逆にサービスが実際に入出力をおこなうデータの通信には即時性が求められるため UDP (User Datagram Protocol) ベースの OSC を用いている。

また音楽を扱うという特性上、サービスが入出力するデータは単なるトリガではなく、二種類のデータを用いる。一つは 0~255 の整数値 (以下、整数データ) であり、もう一つは 44.1kHz, 16bit モノラル PCM データ (以下、オーディオデータ) である。なお、コンピュータ上で動作するサービスは全て C++ で実装されている。

3.3.3 サービスの詳細

以下では、サウンドアート作品を構築する上での基本サービスである音源、ローパスフィルタ、リングモジュレータそれぞれのサービスと、日用品である引き出し、ライト、扇風機、コーヒーマル、スピーカそれぞれのサービスについて詳細を述べる。

音楽作品構築のための基本サービス

1. 音源本システムでは、音源に仮想のオルゴール (キラキラ星)、風鈴、明るい曲調のループ BGM、電子音のサービスを用意している。オルゴールはキラキラ星のメロディをオーディオデータとしてリアルタイムに出力する。キラキラ星は整数データを受信すると値に応じて BPM50~200 の間でテンポを変化させる。風鈴、ループ BGM、電子音はそれぞれの音声ファイルをそのままオーディオデータとして出力するサービスであり、入力を持たない。
2. ローパスフィルタローパスフィルタはオーディオデータが入力されると、高周波数帯域がカットされたオーディオデータを出力する。またカットオフ周波数、Q 値、バイパスのパラメータを持っており、整数データが入力されると値に応じてエフェクトのかかり具合が変化する。
3. リングモジュレータリングモジュレータはオーディオデータ入力に対し逆ノコギリ波で AM 変調されたオーディオデータを出力する。このサービスは周波数のパラメータを持っており、整数データが入力されると値に応じて周波数が変化する。ま

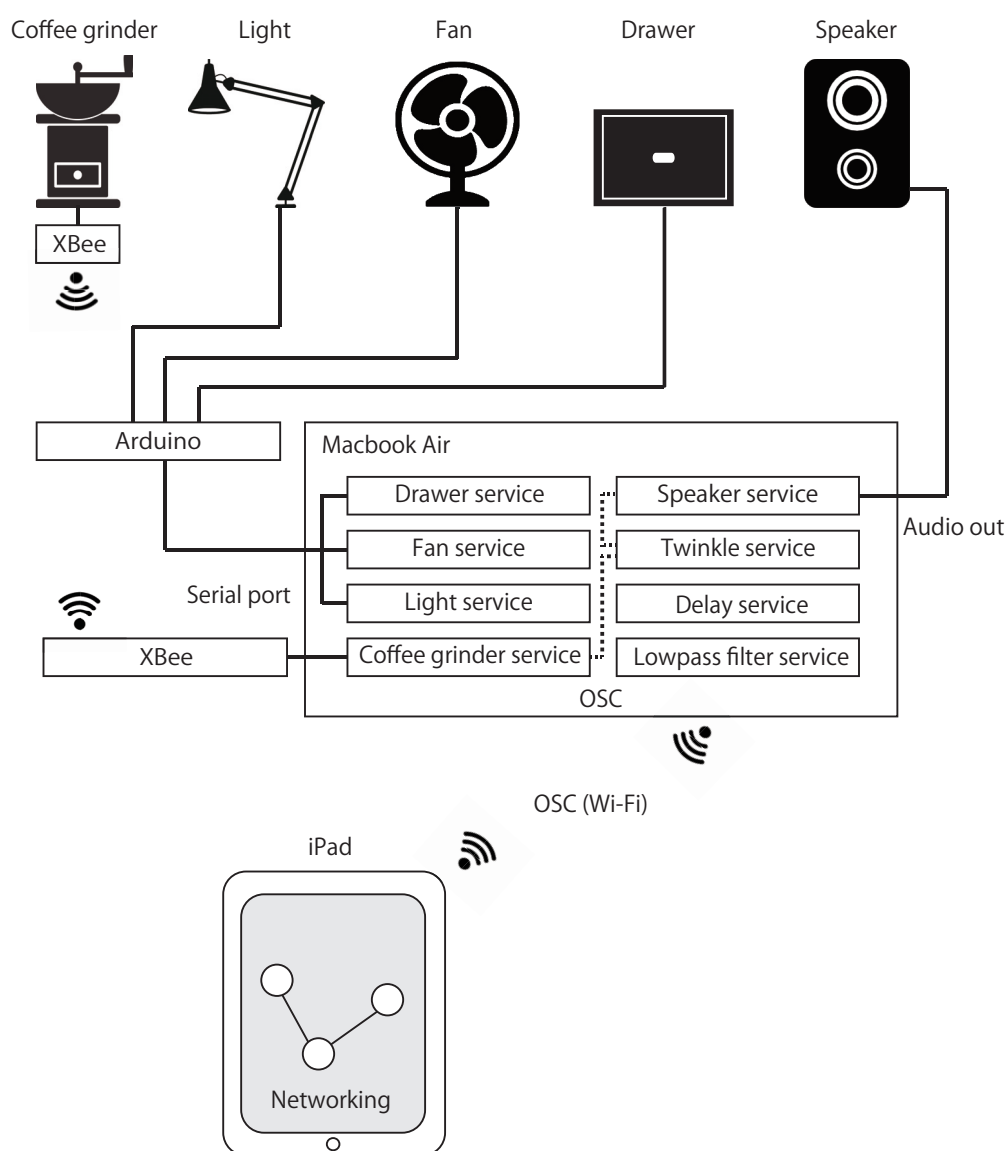


図 3.2 システム構成

た逆ノコギリ波の振幅を 0~255 の整数データで出力する。

日用品のサービス

1. 引き出し

引き出しはどれだけ開いているかを整数データで出力する。引き出し内部には可変抵抗を組み込んでおり、可変抵抗による電圧の変化を Arduino 側で読み取る。この値がシリアル通信でコンピュータへ送られた後、他サービスへ出力される。図 3.3 は引き出しの外観である。



図 3.3 引き出し



図 3.4 ライト

2. ライト

ライトはノブと光源を持ち、ノブ状態の取得と光量の制御が可能である。Arduinoで読み取られたノブの状態をシリアル通信で取得し、他サービスへ整数データを出力する。また他サービスから整数データが入力されると Arduino を介して光量が変わる。図 3.4 はライトの外観である。

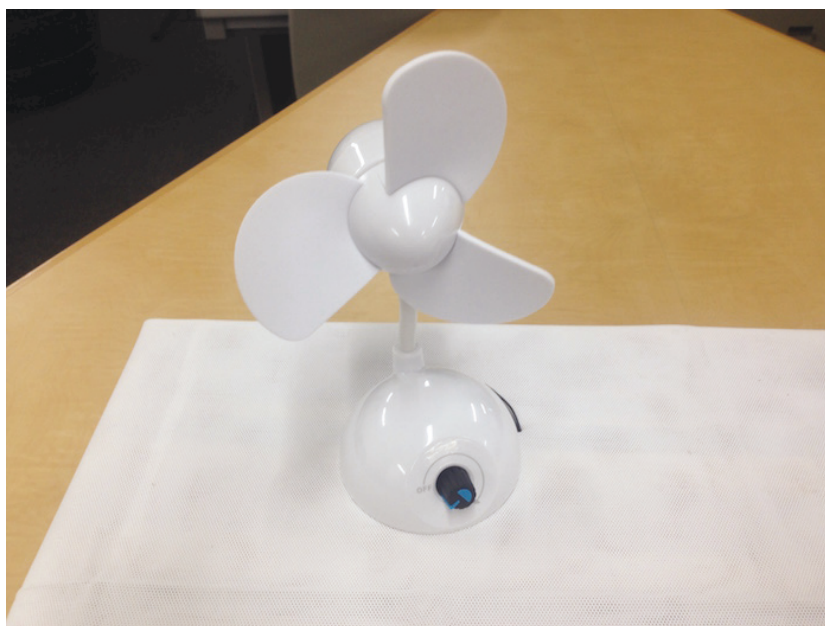


図 3.5 扇風機

3. 扇風機

扇風機はノブとファンを持ち、ノブ状態の取得と風量の制御が可能である。Arduino で読み取られたノブの状態をシリアル通信で取得し、他サービスへ整数データを出力する。また他サービスから整数データが入力されると Arduino を介して風量が変わる。図 3.5 は扇風機の外観である。

4. コーヒーミル

コーヒーミルはハンドルの回転速度を出力する。図 3.6 はコーヒーミルの外観である。ハンドルの角速度に応じて 0~250 の 15 刻みの整数データ (0, 10, 20, ..., 250) が XBee を通じてコンピュータに送信された後、他サービスへ出力される。なお、整数データの 15 は $\pi/4$ ラジアン毎秒に相当する。コーヒーミルのハンドル回転の検出にはロータリーエンコーダと AVR マイコン (ATMEGA328P-PU) を使用している。

5. スピーカ

スピーカはオーディオデータを受信し、実際に音を再生するサービスを提供する。図 3.7 はスピーカの外観である。スピーカは他にもボリューム入力を持っており、他サービスから整数データを受け取ることでボリュームを制御できる。また再生時のオーディオレベルを整数データで出力する。このサービスはソフトウェア上でデジタルのオーディオデータに対して処理を行っている。



図 3.6 コーヒーミル



図 3.7 スピーカ

3.3.4 ネットワーク構築アプリケーション

ネットワーク構築アプリケーションは、LAN上に存在するサービスを分かりやすく表示し、手軽に連結させるためのアプリケーションであり、openFrameworks[17]を用いて実装されている。本アプリケーションは、サービス選択画面とネットワーク構築画面の二種

類の画面からなる。

サービス選択画面（図 3.8 (a)）では、LAN 上に存在するサービスの一覧を表示する。アプリケーションは起動時に、サービス情報の送信依頼をブロードキャスト送信する。サービスは依頼を受信すると、アプリケーションに対して自身のサービス情報を返信する。アプリケーションはサービスから受信したサービス情報から、サービス一覧を画面上に表示する。今回の実装では、引き出し、ライト、扇風機、ミル、キラキラ星、ローパスフィルタ、スピーカの計 8 サービスが表示される。ユーザは表示されたサービスをタッチするとサービス情報の詳細を確認できるウィンドウが現れる（図 3.8 (b)）。サービス情報詳細ウィンドウ上に表示されている「Add」ボタンをタッチするとネットワーク構築画面に移動する。サービスを表すノードの縁には、サービスが提供している入出力を表す点が表示されている。これらは視認性を考慮し、やり取りされるデータの種類と入力か出力かによって色合いを区別している。整数データとオーディオデータはそれぞれ青、赤で表される。また出力の点は全て単色であるが、入力の点は縁以外の部分が暗くなっている（図 3.9）。

ネットワーク構築画面（図 3.10 (a)）では、サービスが画面上にノードとして表示される。ノードを指で移動させ、入力を表す点と出力を表す点同士を近接させると、各ノードの入出力が線で結ばれ、サービス同士が接続されていることを示す（図 3.10 (b)）。同時にアプリケーションは出力側のサービスに対し、入力側のサービスへの接続依頼を送信する。出力側サービスは依頼を受信すると、出力データを入力側サービス側に送信しはじめる。線につながっているノードを遠ざけると線が消え、同時に接続も切れる。また、ネットワーク構築画面においてもノードをタッチするとサービス情報の詳細を確認できるウィンドウが現れる。

各サービスから本アプリケーションへのサービス情報送信、および出力サービスに対する入力サービスへの接続依頼は信頼性を確保するため TCP ベースの OSC プロトコルを用いている。

3.4 システムの評価

本節では、提案システムの評価実験をおこなった結果について考察する。

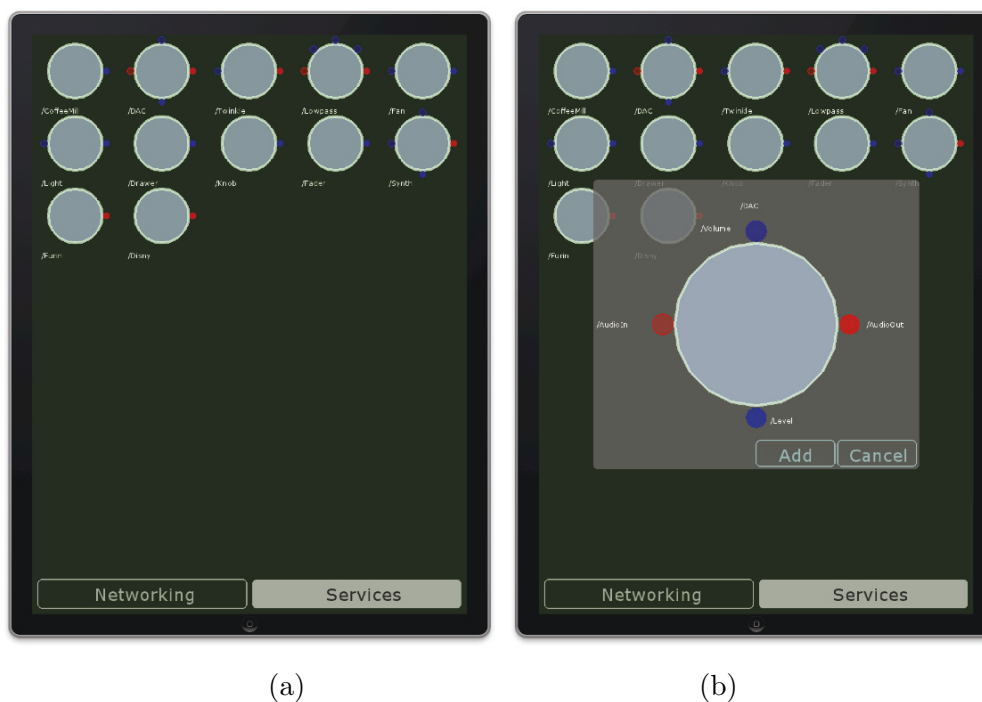


図 3.8 サービス選択画面

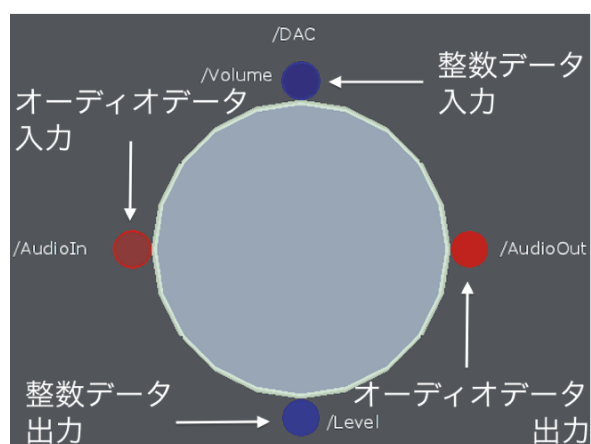


図 3.9 ノード

3.4.1 実験の概要

本章で提案するシステム「MITAI」は、あらゆるモノの状態を取得・制御可能なIoTが浸透した生活環境を想定し、これらのモノが音と組み合わせることで得られる多様なアート体験を創出することを目的としている。このシステムで日用品と音とを組み合わせることによって、従来から音楽制作で用いられているノブやスライダといった入力装置では得られない、印象的な体験を提供できることが重要である。これを踏まえ、本システムにおけ

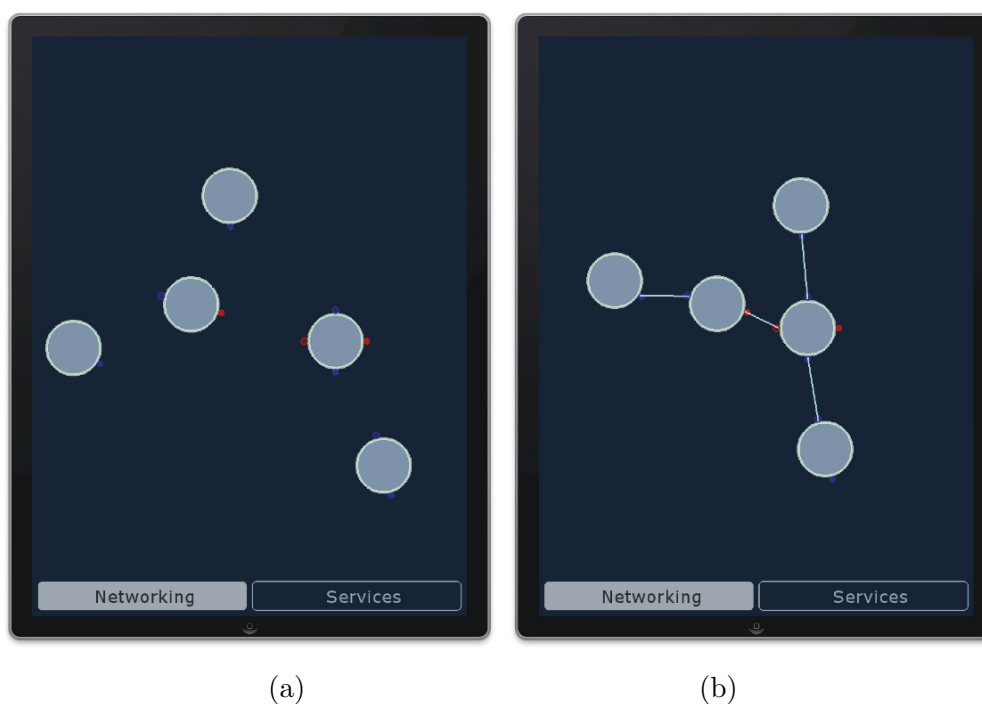


図 3.10 ネットワーク構築画面

るモノと音と組み合わせることによってどのように人に印象を与えうるかを、従来の入力装置であるノブ、スライダと比較する実験を実施した。

本実験では、まず引き出し、ライト、扇風機、コーヒーマルに加え、比較対象としてノブとスライダ(図 3.11)の計 6 種類のモノそれぞれに対し、ある特定の音のパラメータと結びつけた作品を用意する。実験参加者はこれらの作品を体験し、アンケートとインタビューに回答した。なお、実験条件を単純にするため、本実験で変化させられる音パラメータは、各作品一つのみとした。

3.4.2 実験の流れ

具体的な流れは以下のとおりである。実験参加者は、好きな順番で、一度に一つのモノのみ操作する。その後、各々のモノに対して良い印象が残った順に順位をつけるアンケートに回答する。操作のしやすさが作品の印象にも影響すると考えられたため、使いやすさに順位をつけるアンケートにも同様に回答する。その後、好印象度の順位づけの意図に関してインタビューをおこなう。作品は合計で 4 種類あり、同様の手順を残りの 3 つの作品に対しておこなう。作品を体験する順番は実験参加者ごとにランダムとする。なお、本実験には 7 名の実験参加者が参加した。

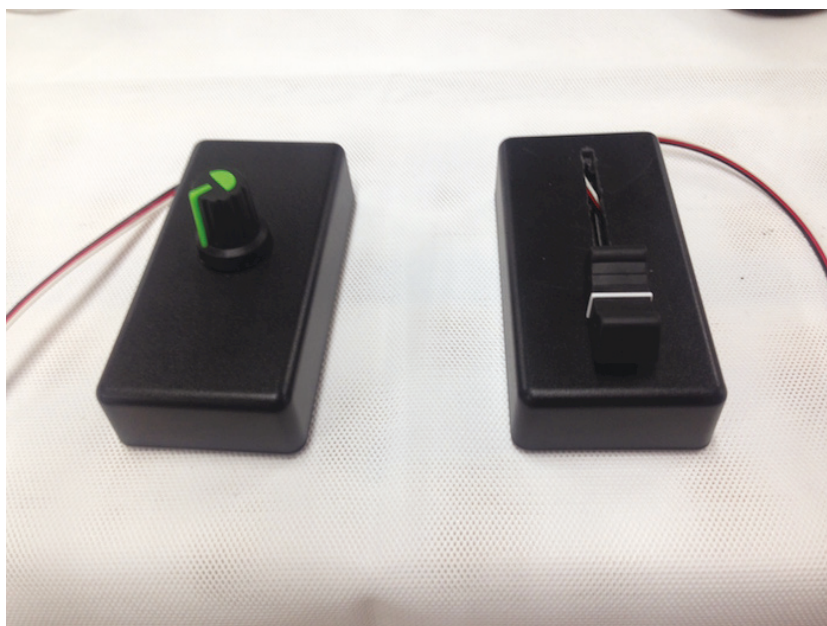


図 3.11 ノブ (左) とスライダ (右)

本システムを用いて評価実験用に構築した作品は以下の通りである。

作品 (1) 風鈴, スピーカがつながっており, 各々のモノを操作すると風鈴の音量が変化する作品

作品 (2) BGM, ローパスフィルタ, スピーカがつながっており, 各々のモノを操作するとローパスフィルタのカットオフ周波数変化する作品

作品 (3) キラキラ星, スピーカがつながっており, 各々のモノを操作するとキラキラ星の速度が変化する作品

作品 (4) 電子音とリングモジュレータ, スピーカがつながっており, 各々のモノを操作するとリングモジュレータの周波数変化する作品

上記作品のうち作品 (4) 以外では, 扇風機・ライトは自身のノブの回転に応じて風量・光量変化する。作品 (4) ではリングモジュレータの逆ノコギリ波の振幅に応じて風量・光量変化する。それぞれの作品は, 扇風機と風鈴の涼しげな演出, 引き出しの中から音楽が聞こえてくるかのようなエフェクト, コーヒーミルを回してオルゴールの演奏, リングモジュレータに同期してライトが明滅, といったように特定のモノが持つ特徴を生かした作品になるよう意図して組み合わせている。

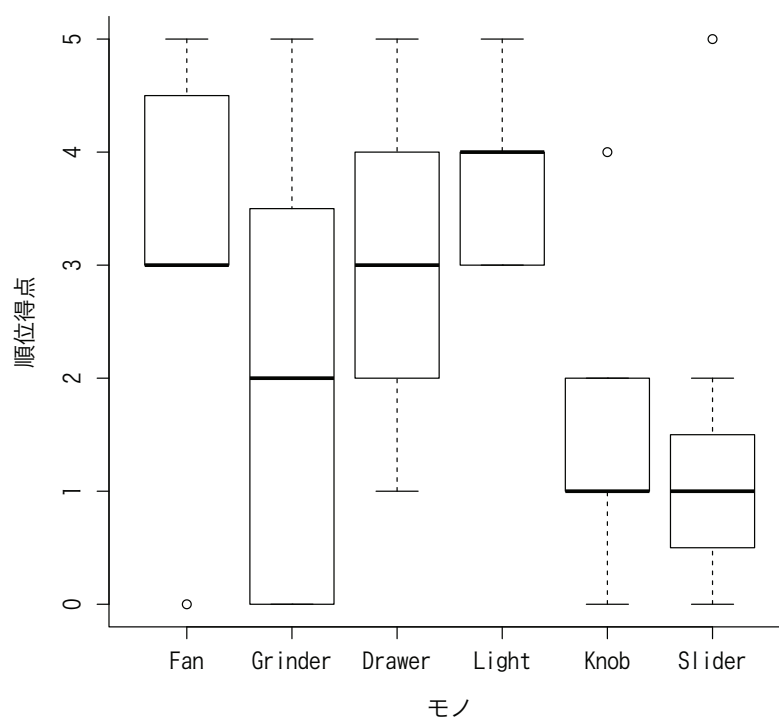


図 3.12 作品 (1) の印象順位得点

3.4.3 実験結果

アンケート結果

各々のモノに対して抱く良い印象の順位をつけるアンケート結果に対して、1位を5点、6位を0点とし、高順位であるほど値が大きくなる順位得点を算出した。この結果を作品ごとに箱ひげ図で表す。どの作品においても抱く印象は個人差が大きく、モノによっては結果が大きく分散している。

図 3.12 は作品 (1) に対する印象順位得点である。扇風機とライトは比較的高い傾向が見られ、コーヒーミルと引き出しは実験参加者によって好みが大きく分かれる結果となった。またノブとスライダに関しては、外れ値を除くと比較的低い傾向が見られた。

図 3.13 は作品 (2) に対する印象順位得点である。全体的に順位得点のばらつきが大きい。作品 (1) と同様、特にコーヒーミルと引き出しは実験参加者によって好みが大きく分かれる結果となった。作品 (2) においてもライトは比較的高い傾向が見られ、ノブも高めの傾向が見られたのに対し、スライダに関しては比較的低い傾向が見られた。

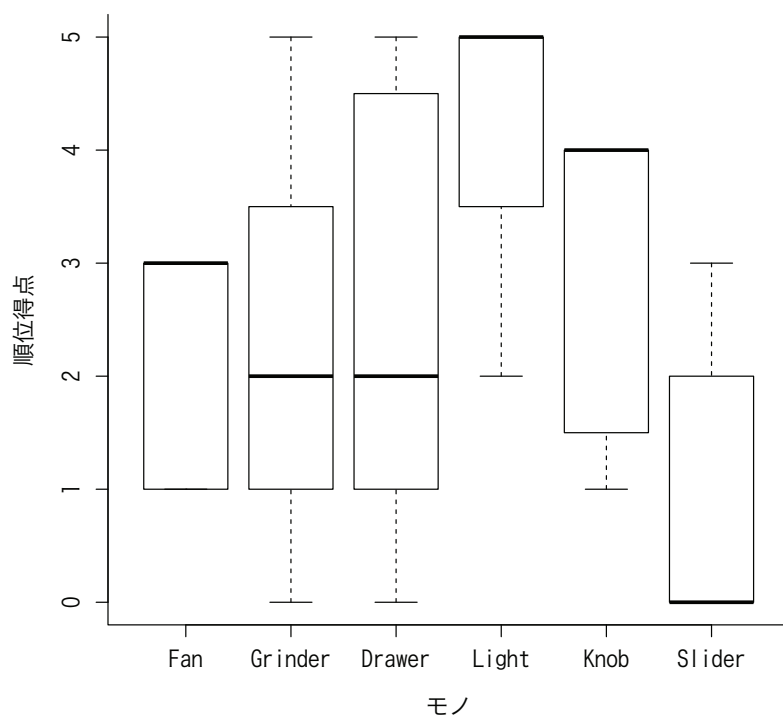


図 3.13 作品 (2) の印象順位得点

図 3.14 は作品 (3) に対する印象順位得点である。こちらではライト，スライダに対する好みのばらつきが顕著に現れた。逆にコーヒーミルに対する印象は総じて高く，引き出しは低めである。

図 3.15 は作品 (4) に対する印象順位得点である。扇風機，ノブ，スライダは好みが非常に分かれたが，ライトは概ね好印象であった。逆にコーヒーミルと引き出しはやや低めの印象となった。

使いやすきの順位に関しても同様に得点として表し，作品ごとに箱ひげ図を示す。図 3.16，図 3.17，図 3.18，図 3.19 はそれぞれ作品 (1)，(2)，(3)，(4) の使いやすき順位得点である。こちらは印象順位得点と異なり，作品間でそれほど大きな違いは見られなかった。ばらつきはあるものの，全体的にコーヒーミル，引き出しが低く，ノブ，スライダ，ライト，扇風機がやや高めとなった。

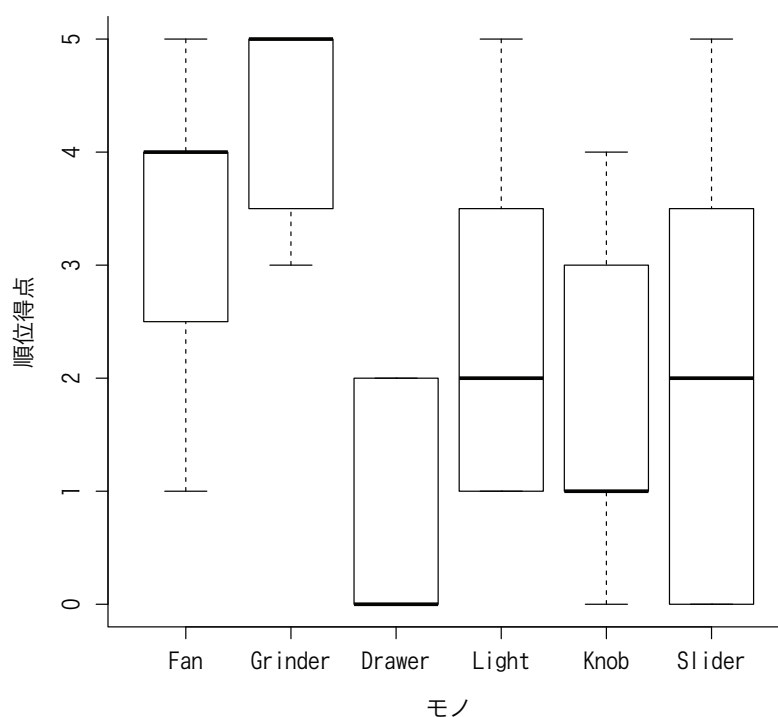


図 3.14 作品 (3) の印象順位得点

インタビュー結果

実験参加者がそれぞれ抱いた印象順位の意図に関してインタビューをおこなった。本節ではインタビューの中から、実験参加者が1位と6位それぞれに選んだモノに対して、その意図をまとめる。

作品 (1) で各実験参加者が1位、6位に選んだモノに対する印象は以下の通りである。

- 扇風機
 - － 風鈴の音と扇風機がマッチしている。
 - － 扇風機の回転の割に音がそれほど大きくないので違和感を感じた。
- ミル
 - － 速く回せばその分音が大きくなるのが印象的だった。
 - － ミルの質感と風鈴の音色がマッチしている。
 - － 速く回さないと音が出てこなくて大変だった。

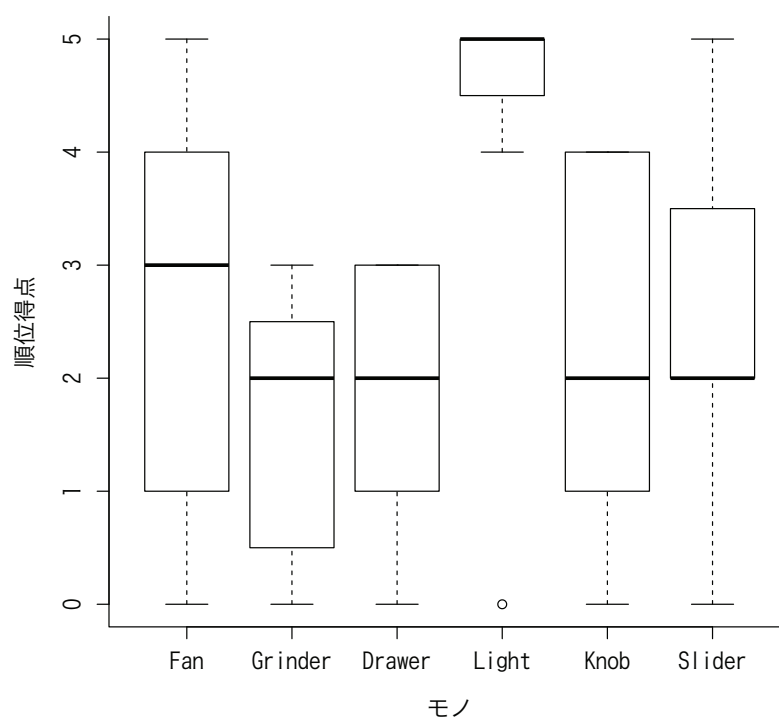


図 3.15 作品 (4) の印象順位得点

- 引き出し
 - 引き出しを開けたら音が出てくる感じがした。
- ノブ
 - 単純で印象に残らなかった。
- スライダ
 - 予想通りの音の出方で、違和感がなかった。
 - 単純で印象に残らなかった。

作品 (2) で各実験参加者が 1 位, 6 位に選んだモノに対する印象は以下の通りである。

- ミル
 - 動かし続けないと音が鳴らないので、その際の音の変動が楽しめた。
 - 速く回さないと音が出てこなくて大変だった。
- 引き出し

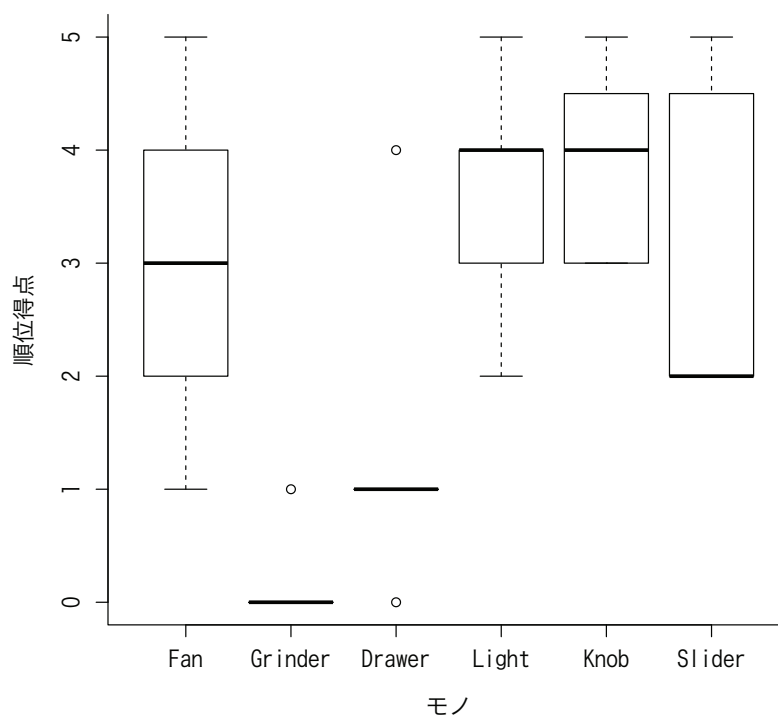


図 3.16 作品 (1) の使いやすさ順位得点

- 音が引き出しから出てくる感じが想像できた。
- ループ音楽では引き出しから出てくる感じがしない。
- ライト
 - ノブがエフェクトをいじるのにあっていて、かつ光がついているのが良かった。
 - 音楽の明度とライトの明るさが連動している。
- スライダ
 - シンプルだったので印象に残らなかった。

作品 (3) で各実験参加者が 1 位, 6 位に選んだモノに対する印象は以下の通りである。

- ミル
 - 自分の動きに連動して音楽が進むので印象的だった。
 - 自分で音楽を演奏しているようだった。
- 引き出し

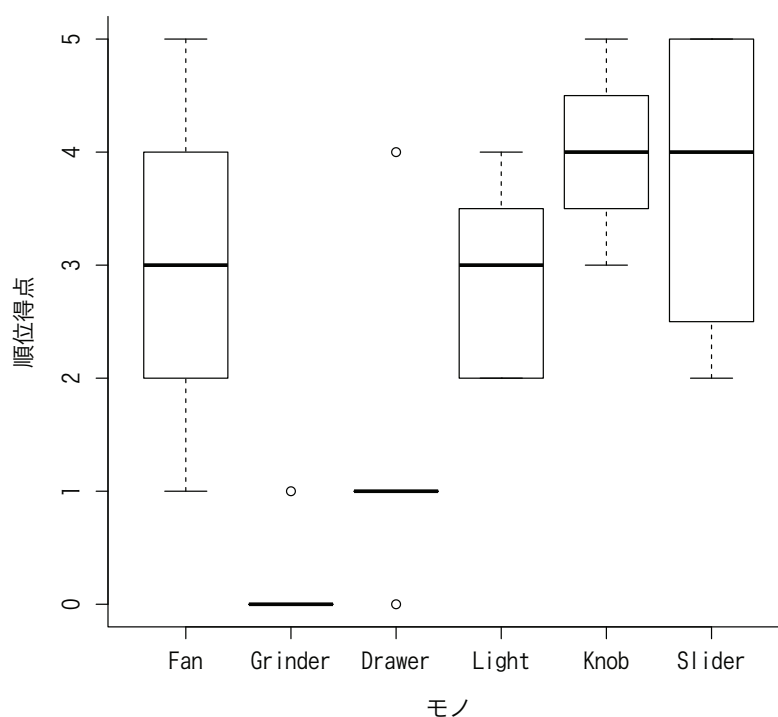


図 3.17 作品 (2) の使いやすさ順位得点

- 細かい調整ができず違和感のある音楽が生成されてしまった。
- 箱の開け閉めが楽しいのに開けっ放しにしていると音楽が進まない。
- ライト
 - キラキラ星という曲と光がマッチしている。
- ノブ
 - ありきたりな感じがした。
- スライダ
 - あまり使ったことがなかったので印象的だった。
 - あまり面白みがなかった。

作品 (4) で各実験参加者が 1 位, 6 位に選んだモノに対する印象は以下の通りである。

- 扇風機
 - 音がファンの回転に連動して楽しい。

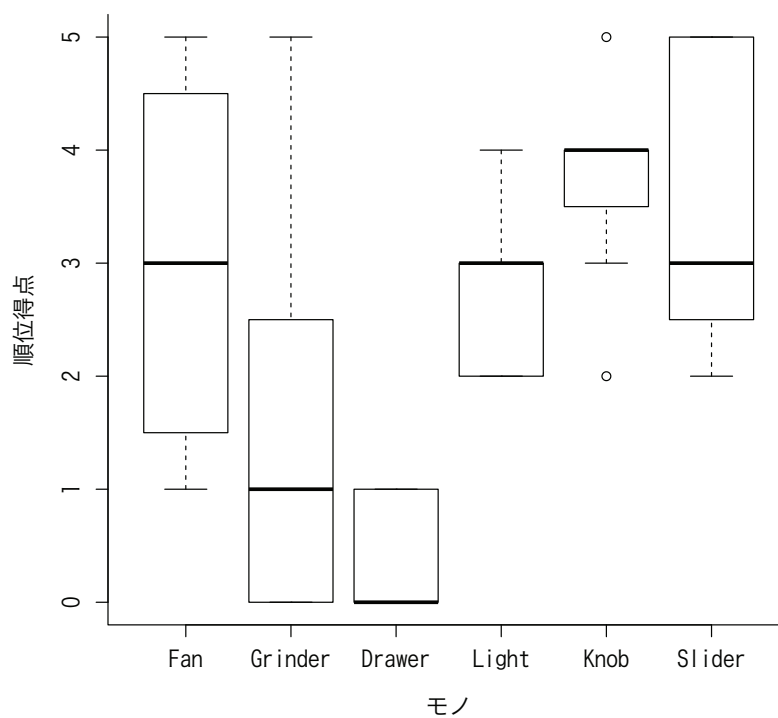


図 3.18 作品 (3) の使いやすさ順位得点

- 思っているよりファンの回転が速すぎる。
- ミル
 - ミルの回転速度をうまくコントロールするのが難しかった。
- 引き出し
 - 音のなり方が引き出しを開ける動作とマッチしていない。
- ライト
 - 音の大きさとライトの明るさが同期していて楽しい。
 - ライトが壊れてしまったかのような音色で印象が悪くなかった。
- スライダ
 - 一番操作に適している。
 - ありふれた感じがした。

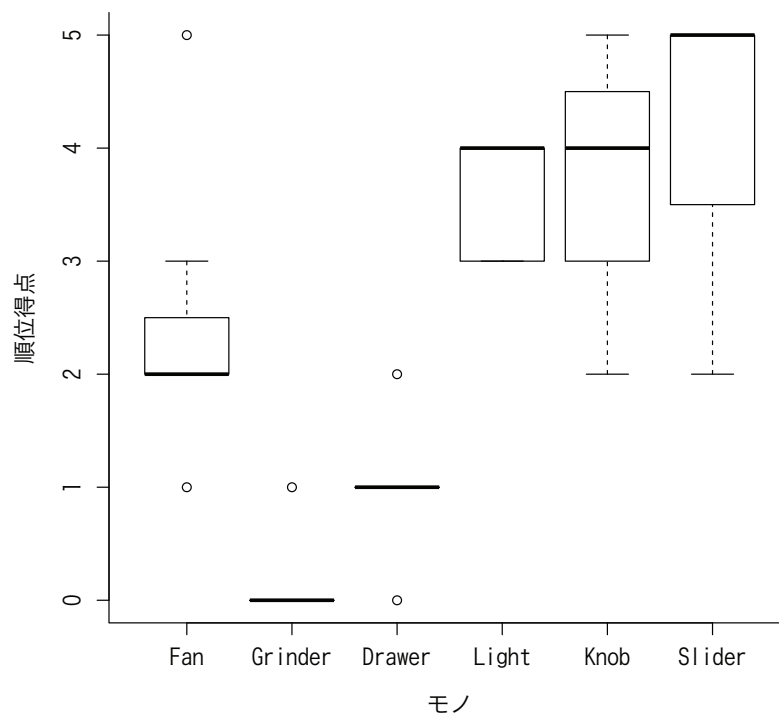


図 3.19 作品 (4) の使いやすさ順位得点

3.4.4 考察

実験で得られたアンケート結果とインタビュー結果をもとに、多様で印象に残るアート体験を創出できていたか考察する。

アンケート結果より、従来から用いられてきた入力装置であるノブやスライダは比較的使いやすいモノとして捉えられていた。また入力部分がノブである扇風機とライトも使いやすさとしてはこれらに準ずると捉えられた。一方、コーヒーミルや引き出しは操作性の観点ではノブやスライダに比べ良くないと答える実験参加者が多かった。しかしながらコーヒーミルにおける作品 (3) や引き出しにおける作品 (2) といった音との組み合わせでは、ノブやスライダに比べて好印象の体験を提供できていたことがアンケートやインタビュー結果から読み取れた。また、扇風機やライトに関しても、それぞれ作品 (1) や作品 (4) において単なるノブ以上の印象を実験参加者に与えていたことが読み取れた。このことから、日常のオブジェクトを用いることで、従来から用いられてきた入力装置とは異なる

る印象を与え、従来のノブやスライダでは得にくい印象的なアート体験が創出された可能性が示唆された。

しかし、ノブやスライダも作品によってはその特徴が活きて好印象を与えていた。作品(2)におけるノブは比較的好印象であり、スライダは総じて印象が低いが、作品(4)においては比較的好印象を得ていたと考えられる。

以上のことから、本システムにおいてモノと音の組み合わせ次第で人に与える印象は多様に変化し、それらがうまく組み合わせることで実験参加者に好印象を与えていたと考察された。

今後の課題としては、実際にユーザが本システムを使用する際のユーザビリティ、ユーザの創作意欲やアイデアの促進に関する評価などが挙げられる。また、本章では作品鑑賞体験に関するアンケート、インタビューを通じた主観評価実験の結果を基に考察をおこなったが、物理的・生理的指標等を用いた客観評価手法についての検討や、本システムを用いた創作体験についての評価実験も必要と思われる。

3.5 おわりに

本章では、あらゆるモノの状態を取得・制御可能なIoTインフラが浸透した生活環境を想定し、これらのモノが音と組み合わせることで得られる多様なアート体験を創出することを目的としたサウンドアート創作メディア「MITAI」を提案し、本システムがもたらす体験の多様性や印象の強さに関して実験をおこなった。その結果、インタラクティブに音が生成される体験の中で、日用品の持つ感性的特徴が有効に機能し、操作性の良し悪しにかかわらず、作品として好印象を与えるモノがあった。これより、人工物とのインタラクションにはシグニファイアだけでなく、そこから連想される様々な感性的特徴が含まれ、それらをアート作品を創作する際のモチーフとして効果的に再利用できる可能性を示した。

参考文献

- [1] Hiroshi Ishii, Ali Mazalek, and Jay Lee. Bottles as a minimal interface to access digital information. In *CHI'01 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 187–188. ACM, 2001.

- [2] Andy Cameron and Systems Design Limited. *The Art of Experimental Interaction Design*. Gingko Press, 2005.
- [3] Don Norman. *The design of everyday things: Revised and expanded edition*. Basic Books (AZ), 2013.
- [4] Daniel Rozin. Wooden mirror. *IEEE Spectrum*, Vol. 38, No. 3, p. 69, 2001.
- [5] Luigi Atzori, Antonio Iera, and Giacomo Morabito. The internet of things: A survey. *Computer networks*, Vol. 54, No. 15, pp. 2787–2805, 2010.
- [6] IFTTT. Connect the apps you love - IFTTT. <https://ifttt.com/> (2015.7 閲覧) .
- [7] Yahoo Japan Corporation. myThings - あなたの毎日が、組み合わせで便利になる. <http://mythings.yahoo.co.jp/> (2015.7 閲覧) .
- [8] 橋岡良, 平井重行. スマート家電やインターネットサービスの統合制御システムとそのビジュアルプログラミング環境. 第 77 回全国大会講演論文集, Vol. 2015, No. 1, pp. 269–270, 2015.
- [9] Hannes Hesse, Andrew McDiarmid, and Rosie Han. The bubblegum sequencer. In *Proceedings of the Conference on Computer Human Interaction (CHI)*, 2008.
- [10] Erika Okude and Yasuaki Kakehi. Rainterior: An interactive water display with illuminating raindrops. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 270–271. ACM, 2011.
- [11] Cycling '74. MAX 7. <https://cycling74.com/max7/> (2015.7 閲覧) .
- [12] James Patten, Ben Recht, and Hiroshi Ishii. Audiopad: a tag-based interface for musical performance. In *Proceedings of the 2002 conference on New interfaces for musical expression*, pp. 1–6. National University of Singapore, 2002.
- [13] S Kaltenbrunner Jordà and M Geiger. G. and bencina, r. the reactable*. In *Proceedings of the International Computer Music Conference*, pp. 579–582, 2005.
- [14] Arduino. Arduino-home. <https://www.arduino.cc/> (2015.7 閲覧) .
- [15] Digi International. Xbee zigbee. <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-zigbee> (2015.7 閲覧) .
- [16] Matthew Wright and Adrian Freed. Open SoundControl: A New Protocol for Communicating with Sound Synthesizers. In *ICMC*, 1997.
- [17] openframeworks. <http://openframeworks.cc/> (2015.7 閲覧) .

第4章

水の形状変化を用いた遠隔地における自然の实在感と美の呈示

4.1 はじめに

古くから人間は五感を駆使して自然の状態を知覚し、その中で自然の美を味わったり、癒しを得てきた。特に日本においては、古くから四季折々の自然の風情を俳句や庭園、生け花、盆栽などで表現する文化が根付いている。また、小学校、中学校などの教育機関では自然体験学習が実施されており、自然の美を愛でる感性や、環境に対する考え方を育む情操教育として位置付けられている [1]。他にも、森林風景を眺めながら活動する森林浴や散策などが趣味や気分転換としてしばしば行われ、その代表的な効果として、心身をリラックスさせる癒しの効果 [2] があると考えられている。人間が自らの身体で自然を捉える行為は、気温や湿度といった単なる物理情報の知覚のみならず、感性にも大いに作用する重要な体験である。

このような自然の持つ感性情報を呈示する手段として、以前からアクアリウム、庭園、生け花、盆栽などの自然を表現した鑑賞物が親しまれている。これらは擬似的な自然環境を構築することで自然の美を創出する感性情報メディアであり、生活空間に「小さな自然の姿」を持ち込み、彩りや癒しを付加する手段として利用されている。

一方、異なる場所に実在する自然の姿を呈示する一般的な手段として、映像メディアが挙げられる。気象ライブカメラ映像や水中カメラ映像など、遠隔地に居なくても実際の自然の様子を把握したり、鑑賞できるコンテンツが提供されている。しかし、自然の持つ感性情報の伝達には実体のない平面の映像ではなく、実体を持つことの重要性が示唆されている。Kahn らの研究によると、3つの被験者グループに、それぞれ本物の自然の風景の

見える窓と、そうした景色を撮影した映像，そして無地の壁のそばに座らせた状態で心拍数を常時測定，監視した結果，本物の自然が見える窓に座ったグループは，他の2グループよりストレスからの心拍数回復力の点で上回っていたことが報告されている [3]．この結果より，同じ視覚刺激であっても，映像ではなく本物の自然を呈示することが癒しを与えるのに効果的であることが示されている．本来，人間は空を見上げたり，雨音に耳を傾けたり，土の濡れた匂いを感じたり，様々な感覚器官で自然の姿を感じ取っており，身体性が大きく関わるマルチモーダルな体験である．したがって，遠隔地に存在する自然の持つ感性情報をより効果的に伝えるには，平面ディスプレイによる単なる光学情報呈示とは異なるアプローチが必要と考えられ，実体のある物質の持つ立体的な視覚情報や触覚，聴覚といったマルチモーダルな感覚情報が，感性情報の伝達に大きく影響していると考えられる．

そこで本章では，物理的実体からのマルチモーダルな感覚刺激によって，遠隔地における自然の実在感と美を呈示することを目指す．ここでは実体のある物質と自然の姿として，水と地球上の水循環に着目する．水は特定の形状を持たず，ダイナミックに形状が変化する物理的特徴を持っている．また，地球上の水循環は蒸発，凝結，降水を繰り返す地球上のプロセスであり，気象現象として日常生活とも密接に関わっている．一方，水と地球上の水循環はこうした物理的特徴のほかに感性的特徴も持っている．水は自然界のいたるところに存在し，涼しさ，清潔さなど豊かな印象を持つ．水の音は川や池といった自然のサウンドスケープを象徴する音であり，リラックスする音として知られている．Thomaらは，音楽のストレス低減効果を検証する研究の中で，水の音を聴取させた後のストレステストにおいて，音楽，無音に比べて有意に唾液コルチゾール濃度が低かったことを示す結果を報告している [4]．このように，水には物理的特徴のみならず重要な感性的特徴を持っており，これらの特徴を情報呈示へ応用することによって，自然の持つ物理情報と感性情報とが融合した豊かなメディア体験が期待できる．

上記を踏まえ，実際の水の形状を実際にコントロールすることによって蒸発，凝結，降水という地球上の任意の土地の水循環や気象状況を呈示するメディア「霞鈴」を提案する．「霞鈴」は，Webによって取得された気象データに基づき，霧生成→凝結→水滴落下のサイクルを人工的に制御し，降水や水循環を表現する鑑賞作品である．また，観賞用作品として，いくつかの演出を付加する．まず，水のダイナミックな変化を水琴窟の音色とLEDの波紋で演出し，実際の草花を生けることで任意の土地の風景を象徴した作品に仕上げる．

このように、本章では遠隔地の大規模な自然の変化を鑑賞物として示すことで、その存在感や美、癒しといった感性情報を呈示することを目指す。

本章では、まず実体を持つ物質として水に着目した関連研究、作品についてまとめ、本章で提案する作品の概要を説明する。その後、本作品で用いる霧発生装置の制御方法や、音と光による演出方法について検討をおこなう。さらに、本作品の展示活動を通じて得られた鑑賞者のフィードバックをまとめ、本作品の持つ感性的作用について考察する。

4.2 関連研究・作品

従来のディスプレイでは表現が難しい情報の呈示や、新たなインタラクション手法を実現するため、水のもつ様々な物理的特徴に着目した研究が報告されている。ここではまず、2次元の映像を表示することを目的としたディスプレイに関する研究事例を紹介する。佐川らによるバブルディスプレイは、水中に気泡を発生させプロジェクタの映像を投影させたディスプレイであり、水中の気泡をかき混ぜたり、アクリル板で気泡群の形状を変化させることで、リアルタイムに映像が変化する新たなインタラクティブディスプレイを提案している [5]。また、堤らは紙が濡れたり蒸発したりする際の色合いの変化を用いて視覚情報を呈示することで、“じわじわ”とした変化を感じ取ることができる視覚情報呈示システムを提案している [6]。また、橋場らは水滴の特徴に着目し、撥水性シート上に乗った水滴を指で動かすことでソフトウェア上の情報を操作、呈示する実体ディスプレイ Water apart を発表している [7]。杉原らは、ウォーターベルと呼ばれる半球状の膜状領域が生じる現象をもとに、水膜内部に人間の頭部を入れることで視覚、触覚、聴覚といった複数の感覚に作用するマルチモーダルディスプレイを開発している [8]。このように、水には様々な特徴や現象が知られており、インタラクティブかつマルチモーダルな情報呈示手段としての活用例が多数報告されている。

次に、水を用いたアート作品について概観する。水が見せる様々な形状や音は、古くから芸術に利用されてきた。噴水はその典型的な例であり、広場や公園の装飾として設置されている。鹿威しは元々鳥獣を威嚇するための装置であったが、日本庭園の風情を象徴する存在となっている。他にも水琴窟はその音によって庭園を演出する装置として知られている。

コンピュータ技術の進歩に伴って、水の形状や音をコンピュータで制御したメディアアート作品も生まれている。松村らは水中に生じる気泡に着目し、気泡と音響を用いた

新たな表現手法の事例と方法論について論じている [9]. 米澤らは、蛇口から流れる水を手で遮ったり解放したりして生じる流量の変化を音楽の要素に割り当てた作品 “Tangible Sound” を発表し、水とのインタラクションを音楽演奏へ応用している [10]. 坂本龍一、高谷史郎による “water state 1” は、水滴を自在に落下させることができる装置を用い、水滴と水面の複雑な変化を生み出すとともに、その様相をサウンドへと反映する作品であり、生命を支える根源的な物質としての水が見せるさまざまな表情の可聴化を試みている [11]. このように、水の形状や音をコンピュータによって制御するアート作品が多数発表されており、「マルチモーダル」や「インタラクティブ」といった特徴がある.

本章で提案するメディアは水の形状変化という物理現象を利用し、主に視覚、聴覚、触覚に作用するマルチモーダルなメディアに位置付けられるが、2次元画像がコンテンツであるディスプレイとは異なり、Web から取得された気象情報を基にした水の形状変化そのものが示す自然の姿がコンテンツである. また、本章で提案するメディアは水の持つ清々しさや癒しといった感性情報を応用したアートとしても位置づけられる. しかし、実際に起こっている水循環という自然のダイナミズムを実際の水の形状変化として五感で体験する作品はあまり知られておらず、本章ではそうした気象の物理情報と自然の美や存在感、癒やしといった感性情報が融合したマルチモーダルな情報呈示を試みる.

4.3 霞鈴の提案

本章では、水槽に生けた草花に対し、超音波振動子による霧、結露した水滴の落下音、LED ディスプレイによる光を用いた演出を付加し、Web から取得された気象情報に基づいた水循環の姿を鑑賞者に呈示するメディア “霞鈴” を提案する. 本節では、まず本作品の概要を述べる. 次に具体的なシステムの実装方法について解説する. また、実装に際して、超音波振動子による霧の生成量、水滴落下音、LED マトリクスの配色パターンと、Web から取得された気象情報とのマッピングについて検討する.

4.3.1 システムの概要

“霞鈴” は、水辺と草花という自然の一部をモチーフとした作品である (図 4.1). 生花のように、ユーザが好みの花を生けられるエリア (生花エリア) と、水槽のように、水草などを植えられるエリア (水辺エリア) に分かれる.

“霞鈴” では、以下の方法で地球上における水の循環、すなわち気象の変化を表現してい



図 4.1 作品「霞鈴」の外観

る。まず、水辺エリアの底に超音波霧発生装置を設置し、Web から取得された天候を基に霧を生成する。霧発生装置の上部には、生成された霧を結露させるアクリルパネルが設置されており、結露した水が水辺エリアへと再び落下することで水音を生成する。

さらに、水滴落下音の音響処理と LED マトリックスの光によって気象変化の演出をする。水滴落下音は水辺エリア底部に取り付けられたマイクによって集音される。降雨時には、水琴窟のように加工された水滴落下音をスピーカから生成する。底面に設置された LED マトリックスは水面を表し、天候によって全体の色が変化する。晴天時には水面の反射光、降雨時には水滴落下音に同期した波紋を表現するアニメーションがそれぞれ生成される。

4.3.2 システムの実装

システムの具体的な実装方法について解説する。システム構成は図 4.2 のとおりである。水辺エリアは 600mm × 600mm × 150mm のアクリル製水槽を用いた。水辺エリアには LED マトリックスの光を拡散させることと水草を安定させる目的で、アクリルストーンを敷き詰めた (図 4.3)。生花エリアは直径 50mm × 高さ 250mm のアクリル製円筒を用い、水辺エリアの中央付近に配置した。霧の生成には、AGPtek 社製超音波霧発生装置を用いた。水滴落下音の集音には、SONY 製マイクロフォン ECM-PC60 を用い、音の再生には BOSE

製スピーカー Computer MusicMonitor M2 を用いた。LED マトリクスには Adafruit 製 64x32 RGB LED Matrix 4mm pitch を 4 つ使い、制御には RaspberryPi 3 Model B を用いた。LED マトリクスの駆動には、スイッチング電源 (DC5V, 20A) を用意した。超音波霧発生装置と LED マトリクスの制御、音響合成、Web からの気象情報取得には Apple, MacBook Air (Late 2015) を用いた。また、気象予報を取得する Web API として OpenWeatherMap[12] を利用した。これらの構成機器類を収納し、水槽の土台 (図 4.4) となる容器を作成し、上部に水槽を配置した。

動作の流れは以下のとおりである。まず Web から取得された天候情報を基に、超音波霧発生装置を PWM 制御し、LED マトリクスの配色を天気に応じて点灯させる。この制御方法の詳細に関しては後述する。次に、天気が雨を示し、マイクから集音された音のレベルが一定の閾値を超えた場合に、ランダムな座標を中心とした波紋のアニメーションを生成する。集音された音は常に高速フーリエ変換によって周波数領域に変換され、同じく周波数領域に変換された水琴窟の音響信号との積を計算し、逆フーリエ変換によって時間領域に変換された信号をスピーカーから出力する。

4.3.3 気象情報と霧, 光, 音情報とのマッピング

地球上の水循環を超音波霧発生装置, LED マトリクス, マイクでリアルタイムに加工された水音によって表現するため, OpenWeatherMap によって取得される気象情報のうち, “晴れ”, “曇り”, “雨” といった天気の詳細を示す記述, 空全体に占める雲量の割合 [%] を作品演出のパラメータとして用いた。LED マトリクスによる配色パターンは, 天気の詳細によって変化させた。“霧”, “雷雨”, “雪” といった記述がまれに現れるが, これらは “雨” とみなした。次に, 空全体に占める雲量の割合に応じて霧の生成量を制御することとした。さらに, 水滴の落下時に鳴る水琴窟の音で降雨を連想させることを意図し, 天気が “雨” を示す時に水滴の落下音を加工したサウンドを再生することとした。

4.3.4 超音波霧発生装置制御方法の検討

超音波霧発生装置の駆動を制御することによって霧の発生量が変化し, 落下する水滴の頻度が変化する。また, 超音波発生装置は霧よりも大きな水しぶきも同時に生成する。霧の生成によって生じる水滴の落下頻度を適切にコントロールする必要があるため, 超音波霧発生装置の制御方法に関して検討をおこない, 一定時間 100 ms 毎に, 空全体に占める雲

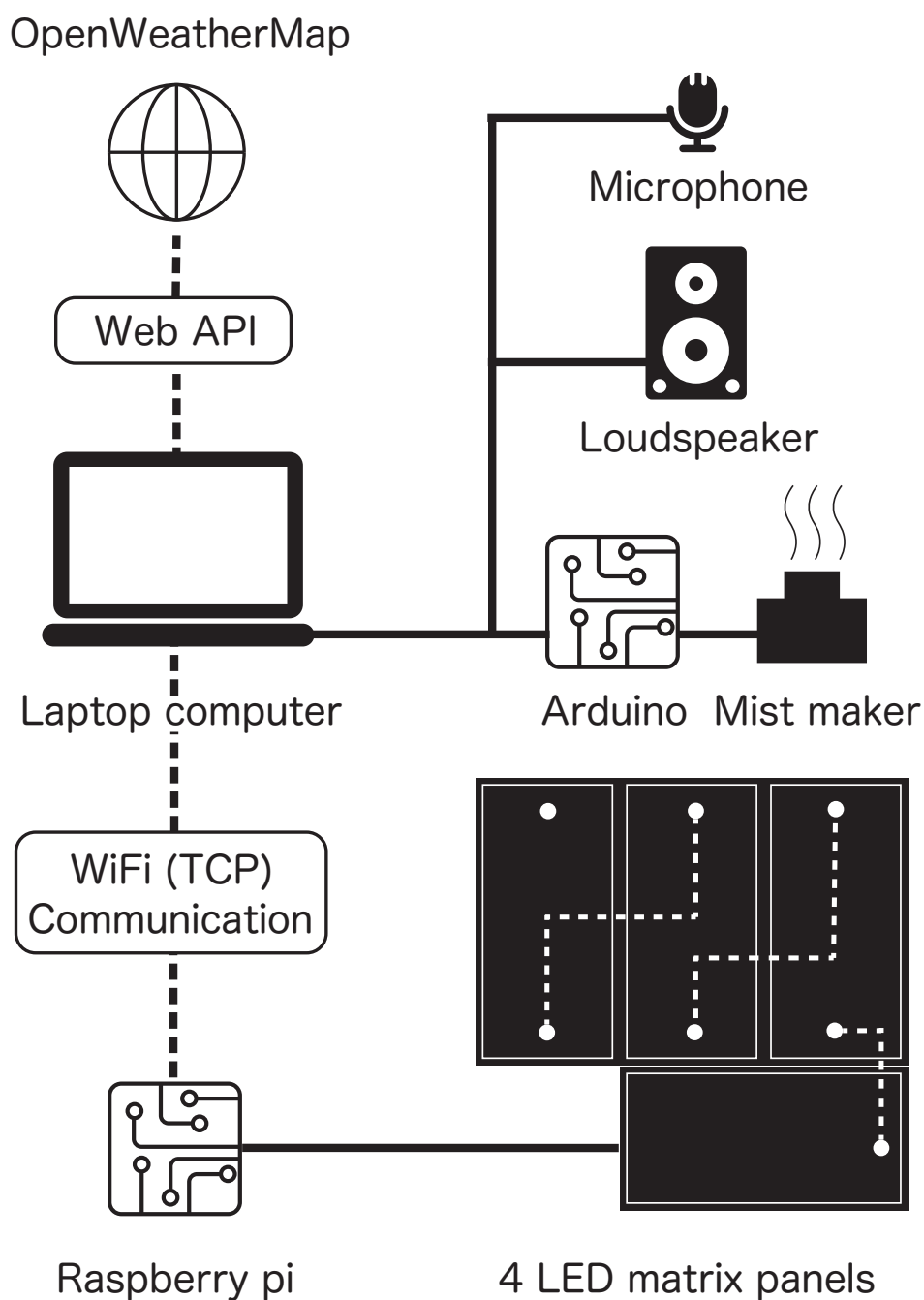


図 4.2 システム構成図

量の割合 $P[\%]$ の確率で超音波霧発生装置を駆動させることとした。

4.3.5 LED マトリクス配色の検討

LED マトリクスによる水辺の演出として、特定の日時や天候を想起させるような配色パターンを検討した。ここでは、晴れ、曇り、雨からなる天候情報と、朝、昼、晩からなる

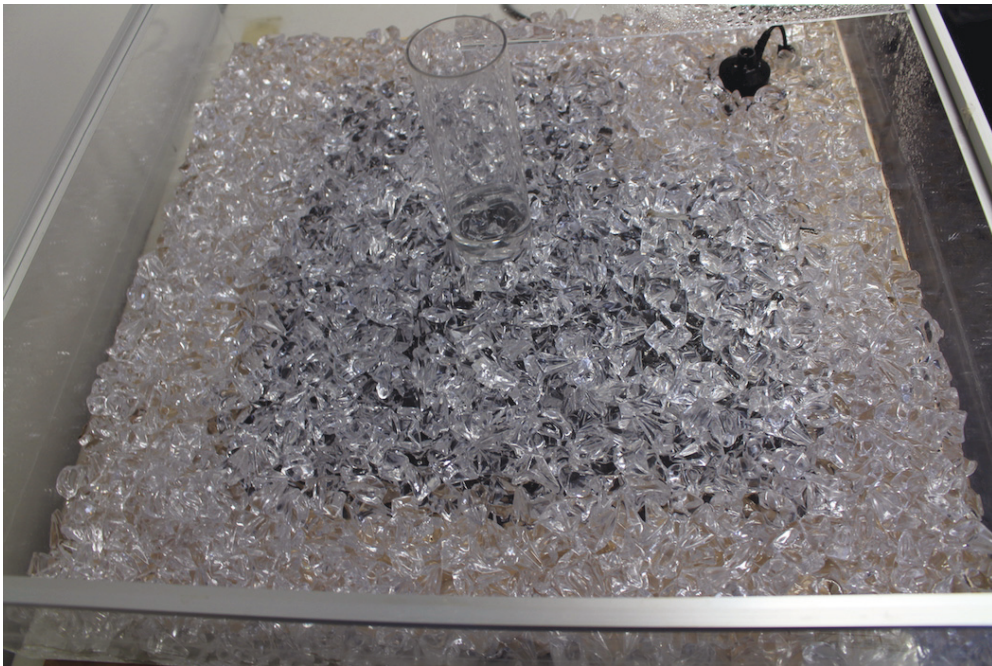


図 4.3 アクリルストーンを敷き詰めた様子

時間情報を配色によって呈示することとした。したがって各項目同士、合計9種類の情報に基づき、背景色と波紋の色からなる配色パターンをユーザに呈示する。天候に合わせた配色パターンに関する文献[13]をもとに、9つの配色パターンを用意した。図4.5に示す配色はそれぞれ、晴れの朝（上段左）、晴れの昼（上段中央）、晴れの夜（中段右）、曇りの朝（中段左）、曇りの昼（中段中央）、曇りの夜（中段右）、雨の朝（中段左）、雨の昼（中段中央）、雨の夜（中段右）を表している。

4.4 展示活動と考察

本作品は水辺、生花エリアに任意の草花を生けることが可能であり、表現したい土地に縁のある草花で演出し、その土地の実際の自然の変化を表現することが可能である。そこで、徳島の自然の姿を反映した本作品を、2016年12月16日から25日の10日間にかけて開催された屋外展示型LEDアートイベント「徳島LEDアートフェスティバル2016」において展示した。本節では、展示の概要、本作品が呈示する気象情報の日時や草花の選定、鑑賞者からのフィードバック、展示の際に確認された課題等を考察する。

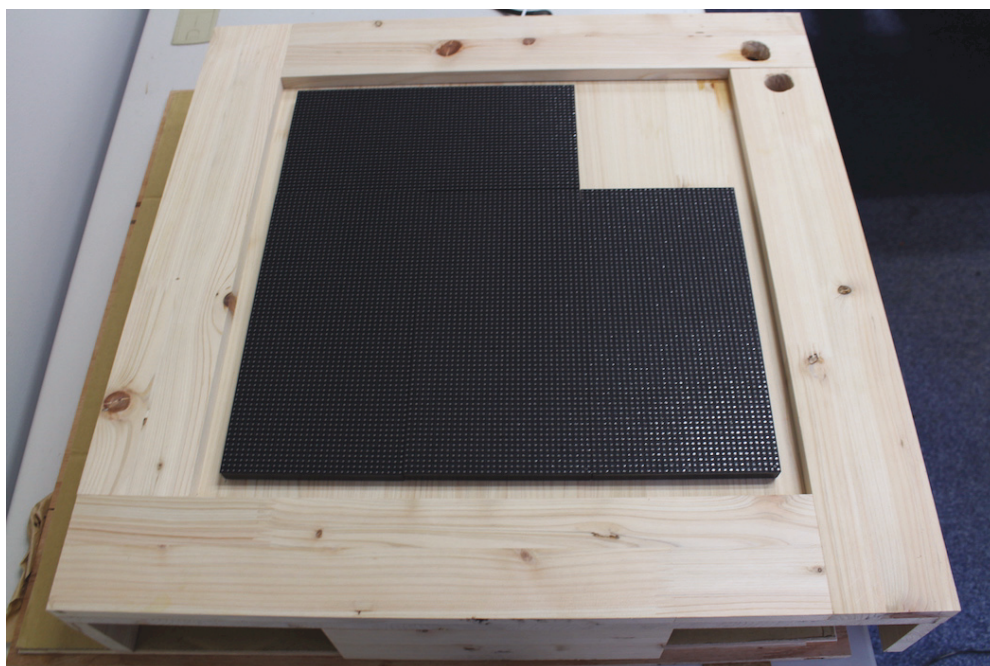


図 4.4 水槽の土台

4.4.1 展示の概要

本作品は、2016年12月16日から25日の10日間にかけて夜間（6:00 PM 10:00 PM）に開催された屋外展示型LEDアートイベント「徳島LEDアートフェスティバル2016」において展示された。このイベントは、徳島市街の川沿いや公園で実施され、LEDという徳島と縁のある技術と、水の街としての徳島の魅力を発信することを目的としたアートフェスティバルである。本作品においても、気象情報を基に徳島の自然が持つ美や存在感、癒やしを伝えることを目的とする作品演出を試みた。図4.6は実際に展示された作品の様子である。なお、本展示イベントは入場無料であり、徳島県内外の多くの来場者（32万人[14]）が作品群を鑑賞した。また、防雨のため作品はアクリルケースで覆われ、アクリルケース越しに作品が鑑賞された。

4.4.2 気象情報の取扱

気象情報は、徳島市のその日一日（6:00 AM 9:00PM）の3時間ごと、6種類の予報を取得しておき（表4.1）、1パターン15秒×6パターンで振り返る形式とした。これは、現在の気象状況を演出に反映させた場合、呈示される演出が夜の配色パターンに限定されて

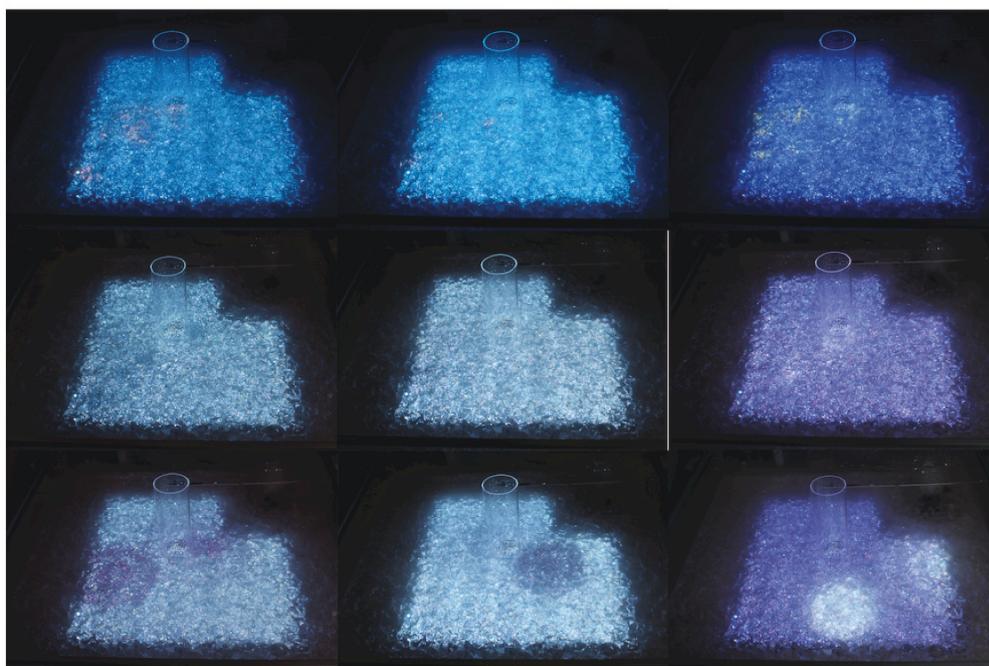


図 4.5 LED マトリクスの配色パターン

しまい、未来の天気では、気象情報が実際に反映されていることを納得しにくいと予想されたためである。本作品が呈示できる様々な演出パターンを数分程度の鑑賞時間の中で表現し、実際の天気が反映されていることを鑑賞者が納得できるように、本展示イベントではこのような形式を取った。また、作品展示場所には本作品のコンセプトや仕組みに関する詳細な説明はなく、来場者向けパンフレットに概要とイメージ図のみが示された。そのため、鑑賞者に対し適宜補足説明をおこない、実際の徳島市の一日の気象データが反映されていることを伝えた。

表 4.1 取得した気象情報の一部

日時	天気の概要	雲量 [%]
2017.12.16 6:00	雨	75
2017.12.16 9:00	雨	75
2017.12.16 12:00	曇り	20
2017.12.16 15:00	晴れ	0
2017.12.16 18:00	晴れ	0
2017.12.16 21:00	晴れ	0



図 4.6 作品展示の様子

4.4.3 草花による演出

本作品では，草花の選定にあたって以下の基準を設け，適当な草花を検討した．

1. 徳島との関連性
2. 季節性
3. 作品性
4. 維持管理の容易さ

1. の徳島との関連性とは，本作品が展示される場所である徳島の魅力を，本作品の草花によって表現できるかという基準である．本作品においては，徳島との関連性を端的に示すものとして，徳島県内の各自治体の花（表 4.2）に着目した．さらに，これらの草花から他の選定基準を踏まえて総合的に検討した．

2. の季節性とは，作品が展示される 12 月にふさわしいかという基準である．特に，冬の季節には枯れてしまったり，冬とは異なる季節のイメージをもつ草花は，本作品に用いる草花として適切でない．したがって，冬に咲くか，もしくは常緑性の植物を選定基準のひ

とつとして位置づけた。

3.の作品性とは、小さな「自然」としての表現性であり、特に本作品の特徴のひとつである水や霞との親和性である。この観点を考慮すると、主に湿地や池などに自生する草花は水や霞と親和性があり、作品性の観点から適していると考えられる。したがって、上記のような水生植物を選定基準のひとつとして位置づけた。

4.の維持管理の容易さとは、最低1日3時間の展示に耐えられることを満たしたうえで、10日間の展示期間中における草花の交換頻度がなるべく少なく済むかという基準である。

上記の基準を満たすものとして、本作品では「水仙」,「セキショウ」(図4.7)を選定し、用いることとした。水仙は「美しく香りも良く、町中どこでも栽培ができ親しみやすい[15]」花として、徳島県美馬郡つるぎ町の花に指定されており、徳島とも縁のある花である。さらに開花時期が11月~4月と冬に咲く花の代表でもあり、12月の展示に適していると言える。維持管理に関しても、農林水産省が公開している切り花の日持ち実験結果[16]によれば、冬場の10日間の展示には十分耐えうる。以上から、上記の選定基準のうち1. 2. 4.を満たしており、水仙を本作品に用いる草花として選定した。また、セキショウは主にアクアリウムやビオトープなどで多く用いられる水生植物であり、こちらも耐寒性があるため、冬場の展示に適している。さらに、前述のとおりセキショウは水生植物であるため、水辺をイメージした本作品とも非常にマッチしており、そうした特徴から維持管理の面においても優れていると言える。以上から、上記の選定基準のうち2. 3. 4.の基準を満たしており、セキショウを本作品に用いる草花として選定した。



(a) 水仙



(b) セキショウ

図4.7 選定された草花

表 4.2 徳島県内の各自治体の花

自治体	花	開花時期	自治体	花	開花時期
徳島県	すだち	5月	上板町	藍	9～10月
徳島市	サクラ	3～4月	吉野川市	キク	品種による
佐那河内村	シャクナゲ	5月	阿波市	コスモス	9～10月
石井町	藤	9～10月	阿南市	ひまわり	7～9月
神山町	梅	1～3月	那賀町	記載なし	
小松島市	ハナミズキ	10月	牟岐町	ハマユウ	7～9月
勝浦町	コスモス	9～10月	美波町	サクラ	3～4月
上勝町	リンドウ	9～10月	海陽町	さつき	5～6月
鳴門市	ハマボウ	7～8月	美馬市	百日紅	7～9月
北島町	キク	品種による	つるぎ町	水仙	11～4月
松茂町	松葉菊	4～6月	三好市	サギソウ	7～9月
藍住町	キク	品種による	東みよし町	サルビア	7～11月
板野町	サクラ	3～4月			

4.4.4 鑑賞者からのフィードバックと展示における課題

展示中、口頭で作品の意図について説明を受けた鑑賞者の一部から、コメントや意見を受け取った。徳島の天候が反映されていることを伝えられた鑑賞者は、その説明に納得した上で、「きれい」、「幻想的」といった作品の見た目に関する好意的な意見が得られた。特に「きれい」という意見に関しては、非常に多くの鑑賞者が一言目にコメントしており、本作品が目指した自然の美が鑑賞者に呈示できていたことを示している。本作品が鑑賞者の自然の美を感じ取る感性に作用できていたことから、同様に癒しを与える作用の存在も十分考えられる。

また、「雨（晴れ、曇り）の日だとどのような色になるのか」という演出に対する興味を示す鑑賞者や、「曇ってよく見えない」といった作品の視認性の低さを指摘する意見も得られた。他にも、中央に生けられた水仙の花には多くの鑑賞者が注目し、一目で水仙であることを認識する鑑賞者も多かった一方で、それが生花か造花かの判別に苦慮する人が多く見られた。また、説明を受けるまで中に本物の水が入っていることに気づかなかった鑑賞者も多くみられた。これらは、夜間のやや曇ったアクリルケース越しでの展示による視認性の低下が原因と思われる。視認性を向上させることで、作品が示す自然の存在感をよ

り強く伝える事ができると考えられる。

次に、展示中に浮上した課題点について考察する。本イベントは屋外での展示であったため、これに起因する課題点がいくつか挙げられる。まず、先述のとおり展示中は防雨のためアクリルケースで作品が覆われ、さらに外気温が低かったため、ケース全体が結露し作品の視認性が低下する問題が確認された。作品の性格上、ある程度の視認性低下は想定されたが、冬場の屋外展示にはケースの曇り止め対策が必要であった。また、マイクとスピーカの位置を近づけるとハウリングを起こすため、作品内でなるべく隔離された。しかしアクリルケースで覆われたことと周囲の雑音の影響により、十分に聞こえる音量で水音を呈示することが困難であった。しかしこの点については、耳を澄ませれば聞こえる程度の音量であり、水琴窟という音の性格上それほど深刻な問題とはならなかった。

4.4.5 今後の展望

今回の展示では、アクリルケースで覆う形式のために生じた問題がいくつか確認されたが、屋内の展示であれば、ケースを取り外すことである程度解決できると考えられる。また、今回の展示は展示場所である徳島の魅力を伝えるため、徳島の天候に基づいた演出をおこなったが、展示場所にとらわれず、ユーザの興味ある土地をインタラクティブに呈示するスタイルなども考えられる。他にも、演出のための情報として天気の詳細、降水量、雲量を用いたが、他にも風向や風速、湿度、日の出、日の入り時間など、多様な気象情報が入手できる。これらの情報を複合的に演出に取り入れることによって、自然の姿をより多彩に表現することにもつなげられる。

4.5 おわりに

本章では、実際の水の形状制御によって地球上の任意の土地の水循環（蒸発、凝結、降水からなる地球上の水の変化）を表現することで気象状況を呈示するメディア“霞鈴”を提案し、遠隔地の大規模な自然の変化を鑑賞物として呈示することで、その存在感や癒しといった感性情報を呈示することを目指した。

まずは人工的に生成される霧と、結露し落下する際の水音を用いて気象の変化を呈示するため、霧の発生量の制御方法や、音と光による演出方法について検討をおこなった。さらに、本作品の展示活動を通じて得られた鑑賞者のフィードバックや課題について考察した。展示中は非常に多くの鑑賞者が一言目に「きれい」とコメントしており、本作品が目

指した自然の美が鑑賞者に呈示できていたことが示された。本作品が鑑賞者の自然の美を感じ取る感性に作用できていたことから、同様に癒しを与える作用の存在も十分考えられる。これより、実在する自然と物理的に類似したマルチモーダルな感覚刺激を呈示することによって、自然の実在感や美、癒しといった感性情報を伝達でき、それには物理的実体を持つオブジェクトを実在する自然の象徴として用いることが有効である可能性を示した。

今後は展示場所にとらわれず、ユーザの興味ある土地をインタラクティブに呈示するスタイルや、演出のための情報として風向や風速、湿度、日の出、日の入り時間など、多様な気象情報を複合的に演出に取り入れることによって、自然の姿をより多彩に表現することにつなげてゆきたい。

参考文献

- [1] 国立教育政策研究所教育課程研究センター. 環境教育指導資料. 2007.
- [2] M Yamaguchi, M Deguchi, and Y Miyazaki. The effects of exercise in forest and urban environments on sympathetic nervous activity of normal young adults. *Journal of International Medical Research*, Vol. 34, No. 2, pp. 152–159, 2006.
- [3] Peter H Kahn Jr, Rachel L Severson, and Jolina H Ruckert. The human relation with nature and technological nature. *Current Directions in Psychological Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 37–42, 2009.
- [4] Myriam V Thoma, Roberto La Marca, Rebecca Brönnimann, Linda Finkel, Ulrike Ehlert, and Urs M Nater. The effect of music on the human stress response. *PloS one*, Vol. 8, No. 8, p. e70156, 2013.
- [5] 佐川俊介, 小川剛史. バブルディスプレイ: 水中の気泡を用いたインタラクティブ映像システム. 情報処理学会論文誌デジタルコンテンツ (DCON), Vol. 2, No. 1, pp. 16–23, 2014.
- [6] 堤修平, 園田知美, 松下光範. Evaporation Display: 水の蒸発速度の違いを利用した情報提示システム. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2013 論文集, Vol. 2013, pp. 56–61, 2013.
- [7] Yasuhito Hashiba and Hiroya Igarashi. Water apart: A substantial display based on material property of water. In *PROCEEDINGS OF THE ANNUAL CONFERENCE*

- OF JSSD THE 62st ANNUAL CONFERENCE OF JSSD*, p. 14. Japanese Society for the Science of Design, 2015.
- [8] 杉原有紀, 館障. かぶり型水ディスプレイの開発. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 6, No. 2, pp. 145–152, 2001.
- [9] 松村誠一郎, 鈴木太郎, 荒川忠一, 伊藤隆道. 気泡と音響を用いたインタラクティブアート: インタラクティブアートとインターフェイスの新たな可能性. 環境芸術: 環境芸術学会論文集, No. 2, pp. 29–36, 2002.
- [10] 米澤朋子, 間瀬健二. 流体による楽器インタラクション (<特集> インタラクティブアート). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 5, No. 1, pp. 755–762, 2000.
- [11] 坂本龍一, 高谷史郎. water state 1 (水の様態1), 2014.
- [12] OpenWeatherMap.
<https://openweathermap.org/> (2017.7.20 閲覧).
- [13] 石田恭嗣. 配色イメージ見本帳. エムディエヌコーポレーション, 東京, 2005.
- [14] 徳島新聞. 光の祭典名残惜しむ 徳島LEDアートフェス【徳島ニュース】.
http://www.topics.or.jp/localNews/news/2016/12/2016_14827292964701.html
(2017.7.20 閲覧).
- [15] つるぎ町 Web サイト.
http://www.town.tokushima-tsurugi.lg.jp/index_oitati.html (2017.7.20 閲覧).
- [16] 農林水産省 Web サイト. 切り花の日持ち実験結果.
<http://www.maff.go.jp/j/seisan/kaki/flower/pdf/syousai.pdf> (2017.7.20 閲覧).

第5章

物理的実体を持つ指型叩打装置による リズム演奏者の存在感呈示

5.1 はじめに

音楽をはじめとした舞台芸術は、演者と観客の存在感や、両者のインタラクションによって生み出される独特の一体感が一つの価値である。このような芸術の創造支援には、人のインタラクションの本質を解明し、演者と観客の存在感や一体感を生み出すことが不可欠である。三輪は演奏者不在の、異なる場所で録音され複製された音楽を“録楽”と呼んで区別しており、人間の手によって演奏され、その場で聴かれる“音楽”の重要性を唱えている [1]。また、Small は音楽作品を自律的存在ととらえる西洋近代の音楽観を批判しており、「ミュージッキング」という概念を通して、音楽の本質的な意味は作品や楽譜にあるのではなく、それを実践する行為にこそ存在するという主張を多角的に展開している [2]。このように、音楽は単なる音響信号の伝達だけではなく、人間による主体的、能動的、対話的な活動としても解釈されている。

一方で、時間や場所を問わず手軽に音楽を楽しむための様々な技術がこれまでに考案されてきた。近年の電子工学や情報工学分野における急速な発展に伴い、コンピュータをはじめとする電子機器を、音楽の記録や演奏へと応用する動きが活発に広まっている。音楽鑑賞の面では、携帯音楽プレーヤーや音響情報の圧縮技術により、時間や場所を問わず音楽をより手軽に聴取できるようになった。また、音楽演奏や制作の面では、シンセサイザによって従来の楽器では表現できなかった新たな音色を生み出すことや、DAW(Digital Audio Workstation)によって、演奏者や楽器が存在しなくても、楽器演奏を音響信号として再現することが可能となった [3]。こうした音楽情報処理技術は、音楽における音響信

号の記録・再現に特化することで、音楽行為における身体や時間、場所などに関する制限から解放してきたと言える。しかしながら、演奏者の存在感を呈示することは不十分であった。

演者と観客の存在感や一体感を呈示する足がかりとして、身体表現に着目したメディアに関する研究が進められている。これらの研究では、遠隔地であっても演者と観客の存在感や一体感を生み出すメディアの創出を目的としており [4]、中でもロボットの動作や質感を利用することで、遠隔地にいる人間の存在感を再現する研究が報告されている [5]。このような人間の身体性は、人間の存在感や一体感を呈示する手段としての有効性が示されている。音楽演奏を支援するメディアにおいても、実体を持つロボットの動作や質感を利用することで演奏者による身体表現を観客に呈示できれば、演奏者の存在感が感じられ、より一体感のある音楽体験に繋げられる。

そこで本章では、デジタル音楽演奏メディアの利便性と演奏者の存在感呈示を両立することを目指し、“環境に遍在する擬似身体”という概念を導入する。すなわち、音楽演奏において欠かせない演奏者の身体を模した造形物（擬似身体）によって、まるでそこに演奏者がいるかのような存在感を呈示する。また、演奏者自身によって与えられた演奏情報を基に擬似身体を駆動することで、実際の発音体を発音させ音楽を生成する。さらに、任意の時間や場所で擬似身体による演奏を可能とするために、あらゆる発音体に対し演奏者の擬似身体が遍在する環境を構築し、時間や場所、身体のリミットから解放する。Weiser は “Ubiquitous Computing” [6] という概念を提唱し、コンピュータが環境に遍在し、任意の時間や場所で所望の情報をやり取りできるというコンピューティングの未来像を提案している。本章では、この概念を演奏者の存在感という情報へと応用し、実体を持つ演奏者の擬似身体を環境（発音体）に遍在させることで、任意の時間や場所で演奏者の実在感を呈示する音楽演奏メディアの実現を目指す。

その一端として、ここでは“指”が物質を“叩く”行為に着目し、演奏者の存在感を呈示するバーチャルフィンガードラマー「ユビキテル」を提案する。ユビキテルは、実在する人間の指を模したリズム叩打装置であり、ユーザの指によるタップ演奏を記憶し、演奏する。また、複数のユビキテルを用いて複雑なリズムを合奏することや、任意の素材に載せることで様々な音色の演奏をさせることが可能である。人の手指は、物を巧みに操るといった役割とともに、対象の物理情報を取得する重要な役割を持つと言われている [7]。また、“叩く”行為は、環境に存在する多くの物質を発音させることが可能であり、特別な学習

を必要としない比較的シンプルな行為である。そのため、より多くのユーザが演奏者としてこのメディアを利用するのに適している。このような理由から、本章では“指”による“叩く”行為を採用する。

次節以降では、本章と関連する研究について概観し、人間の指による叩打音を再現する機構について検討する。次に、試作品の展示活動を通じて得られた体験者のフィードバックをまとめ、本作品の持つ表現性について考察する。

5.2 関連研究

本章では、実体を持つ指型演奏装置によって演奏者の存在感を呈示することを目指す。本節ではそうした機械式自動音楽演奏装置や、ロボットによる人間の存在感呈示に関するこれまでの研究について論じ、研究の位置付けを示す。

機械式の自動音楽演奏装置は古くから存在し、今日でもオルゴールやパンチカード式のオルガニート、自動演奏ピアノなどが親しまれている。18世紀のスイス時計職人であったJaquet-Drozは、オートマタと呼ばれる機械式人形がオルガンを演奏する作品を製作しており [8]、実際の演奏者がいなくても音楽を鑑賞可能にしている。他にも、KintzingとRoentgenはマリー・アントワネットの依頼を受け、チェンバロを演奏する人形装置を製作している [8]。その後、ロボット技術の発展に伴って音楽演奏を行うロボットが登場した。梶谷らによる、リコーダとバイオリンとチェロの演奏を行うロボット“MUBOT” [9] や、菅野らによる、楽譜を読み取りキーボードを演奏するロボット“WABOT-2” [10] などがその例である。こうした音楽演奏ロボットに関する研究は、人間の様々な行為を再現する人間型ロボット研究の一環として位置付けられており、本章の目的である演奏者の存在感呈示とは異なっている。そのため、実際の人間の動きを模倣しているが、必ずしも見た目や質感などは再現されていない。

人間の身体性を応用し、人間の存在感や一体感を呈示するメディアに関する研究として、渡辺は音声対話におけるうなずきや身振りなどの身体的リズムの引き込みをロボットやCGキャラクターのメディアに導入した「心が通う身体的コミュニケーションシステムE-COSMIC(Embodied Communication System for Mind Connection)」を開発し、このシステムを通じて対話者相互の身体性の共有や、一体感を生み出している [11]。また、三輪らは、演者と観客が共に同じ場所に存在しているような共存在感を呈示する手段として「身体の影」に着目し、離れた場所にいる人々の人影を互いに別の空間の対応する位置に送り

合う影システムを開発している。さらに、このシステムによって互いの存在が身体的に関係付けられ、共存在感や距離感が生成されることを示している [12]。他にも、ロボットを用いた存在感呈示に関する研究として、石黒らは実際の人間の見た目や動き、質感を模倣したアンドロイド Geminoid[13] を開発しており、人間の存在感を遠隔地へ伝達することを目指している。同様に、高橋らはライブビデオストリーミングにおいて、実際の人間の腕を模した拍手装置によって、視聴者が撮影現場にフィジカルな拍手を遠隔伝送するシステムを開発し、装置の動作と音を通じて、撮影現場に視聴者の存在感を呈示できたことを報告している [14]。特に高橋らによる研究は、ロボットの動作によって人間の存在感を遠隔地に呈示する点で本章の内容と深く関係しており、本章では同様の手法で音楽演奏者の存在感を呈示することを試みる。一方で、本システムの特徴は演奏者のための自動音楽演奏メディアとして演奏行為を簡便に記録できる点や、複数の装置を任意の素材に配置することで演奏者の身代わりとして演奏行為を拡張する点にある。

5.3 ユビキテルの提案

本章では、実在する人間の指を模した叩打装置が、ユーザ自身の指による演奏を記憶・演奏することで、演奏者の存在感を呈示するバーチャルフィンガードラマー“ユビキテル” (図 5.1) を提案する。本節ではユビキテルの概要と、システム構成、叩打機構の制作過程、制御方法について述べる。

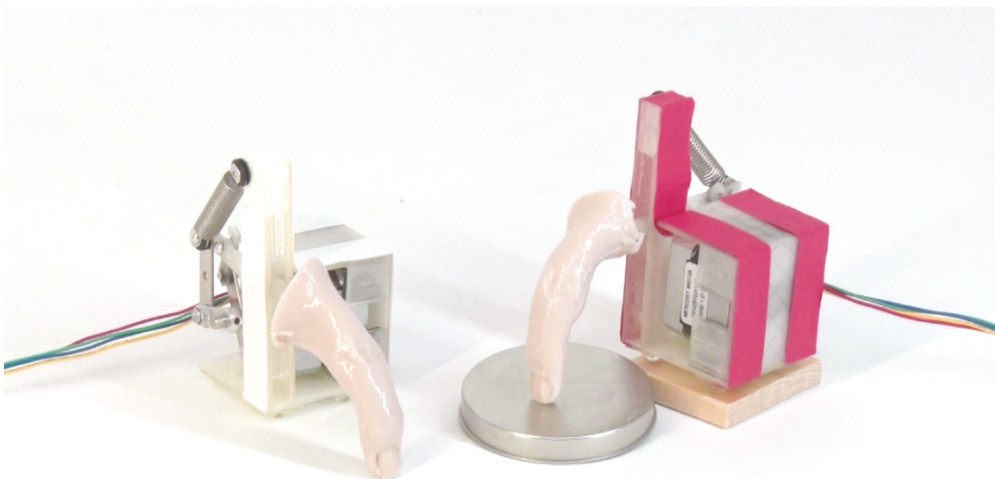


図 5.1 作品「ユビキテル」の外観

5.3.1 システムの概要

“ユビキテル”は、実在する人間の指を模したリズム叩打装置であり、ユーザの指によるタップ演奏を記憶し、演奏する。また、複数のユビキテルを用いて複雑なリズムを合奏することや、任意の素材に載せることで様々な音色の演奏をさせることが可能である。本システムの特徴をまとめたものが以下の5項目である。

- 指の叩打時刻，強弱からなる演奏情報の記録・伝送
- 本物の指に近い見た目，質感，動き
- 指の腹と爪によるリアルな叩打音の再現
- 複数の装置による合奏表現
- 任意の素材（音色）を用いたリズム表現

“ユビキテル”の名称には、複数の意味が込められている。一つは“遍在”を表す“ubiquitous”であり、環境内の任意の場所に配置し、任意の素材を発音体として演奏できることを表す。もう一つは身体の一部として着目した“指”であり、演奏する身体を象徴している。さらに本作品が電動装置であることから、平賀源内による静電気発生装置“エレキテル”になぞらえ、ユビキテル (Ubiquitel) と命名した。

5.3.2 システムの実装

ユビキテル本体は、指の形をした叩打機構と、ネットワーク通信と叩打機構の駆動制御を行う電子回路部分に分かれる。システム構成は図 5.2 のとおりである。本節では、これらの製作過程について述べる。

ユビキテル本体の製作

その場に演奏者がいるかのような存在感を示すため、実際の人間の指を模倣し、人間の肌の質感に近い軟質ウレタン素材を用いた指の造形物を製作した。はじめに実際の指の型を取るため、短時間で硬化する型取り材（アルジネート印象材）によって一時的に指の石膏モデルを用意し、この石膏モデルを用いて繰り返し利用可能なシリコン型を制作した。シリコンの型は、以下の手順で制作した。

1. プラスチック製ブロックで容器を作成し、容器の半分ほどまで粘土を敷く。

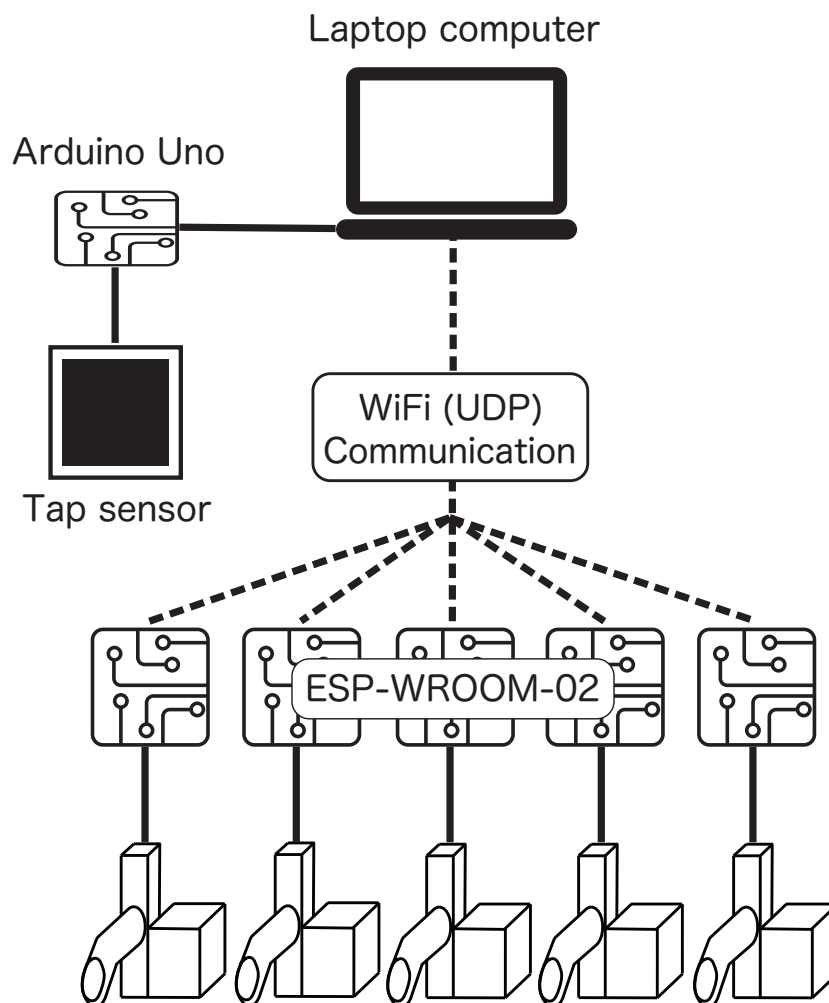


図 5.2 システム構成

2. その粘土に指の石膏モデルと、指の素材を流入する空洞をつくるための円柱を半分ほど埋め込み、粘土と石膏モデルの表面に離型剤を塗布する。
3. その上に型となるシリコンを流入し、1日ほど置く。
4. シリコンが硬化したら、粘土と石膏モデルとシリコンを容器から取り出す。
5. シリコンと石膏モデルから粘土を取り除いたのち、シリコンを底にして再び容器に入れ、離型剤を表面に塗布する。
6. 再度シリコンを流入し、硬化させれば、半分に分割されたシリコン型が完成する（図 5.3）。

次に、シリコン型を用いて指の造形物を製作する過程について述べる。造形物の質感を



図 5.3 指のシリコン型

本物の指に近づけるために軟質ウレタン樹脂を用いるが、素材が柔らかいため十分な叩打音を生み出すことができない。そこで、実際の人間の指のような爪と骨による硬質な叩打音を再現するため、以下の方法で指の先端部分にプラスチックのパーツ（以下、先端チップ）を軟質ウレタン樹脂内に埋め込んだ。

1. ネイルチップ（付け爪）をシリコン型の爪の部分にあてがい、シリコン型に差し込む形で固定する。
2. 3D プリンタで作成した指の先端部分に埋め込むチップをネイルチップと接着する。
3. 指を曲げるパーツ（関節部分）を挿入する空洞をつくるため、直径7mmのパイプを用意し、このパイプの先端部分で爪と先端部分のパーツを固定する。
4. シリコンが硬化したら、粘土と石膏モデルとシリコンを容器から取り出す。
5. この状態でもう一方のシリコン型を被せ、外れないように固定する。
6. この状態で軟質ウレタン樹脂を流入し、1日ほど置いておく。
7. シリコン型から指の造形物を取り出し、表面のタック（ベタつき）や劣化を抑制する表面コート剤を塗布し、1日ほど置いておく。
8. 空洞を作るためのパイプを引き抜く。

叩打機構の概要

叩打機構は大まかに指の骨と関節に相当するパーツと、叩打運動を生み出すステッピングモータ、モータの回転運動を指の振り下ろし運動に変換するレバー類、叩打運動に伴って関節を曲げるワイヤ、これら全体を支える土台のパーツからなる。指はステッピングモータによって上方に振り上げられ、その際にワイヤが緩み、指が伸びた状態となる（図5.4）。その後、強弱情報に基づいた角度まで指を振り上げた状態でモータの駆動力を0にし、バネの力で振り下ろす。振り下ろす動作に伴って関節を曲げるワイヤが引っ張られ、指が曲がった状態で叩打する（図5.5）。振り下ろし時にステッピングモータではなくバネの力を利用したのは、ワイヤを引っ張るために必要なトルクで回転させるには回転速度を下げる必要があり、結果として叩打音が弱まってしまうためである。

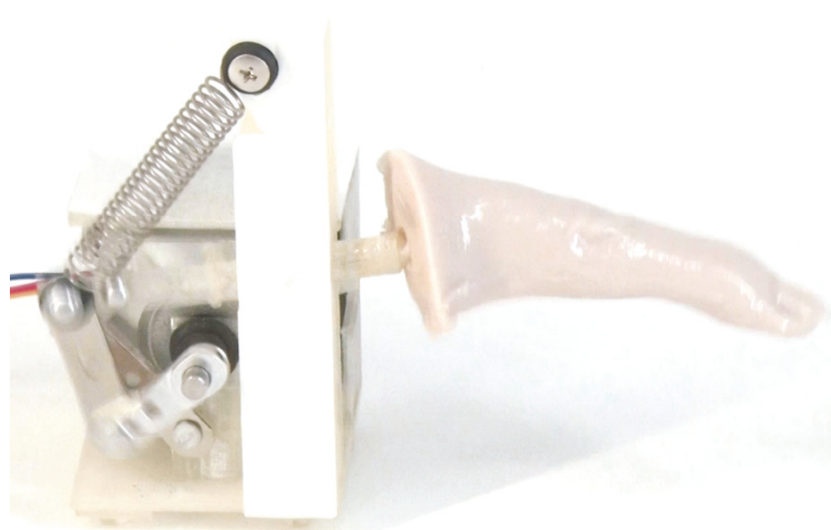


図 5.4 指を振り上げた状態

演奏情報の通信

ユビキテル本体はネットワーク上のノードとして、リズム情報の管理を担うハブからデータを受信し、演奏する。一方、ハブはリズム入力装置を持ち、ユーザからのリズム情報を受け取ったのち、ノードに送信する。通信は Wi-Fi を用いて行い、ハブにとノードにはそれぞれ、ラップトップコンピュータ (Macbook Air)、小型 Wi-Fi モジュール (ESP-WROOM-02) を用いた。

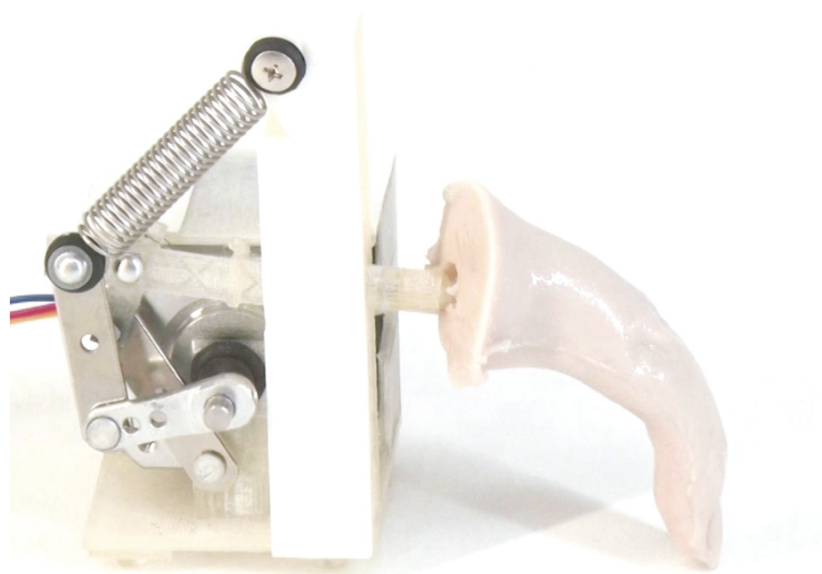


図 5.5 指を振り下ろした状態

ハブの動作

ハブはユビキテル専用 Wi-Fi ネットワーク上のノードを検出し、リズム演奏の管理を行う。また、ユーザからの入力を受け取るタップデバイスを持ち、あらかじめ指定されているノードに対しリズム情報を送信する。ユーザがリズムを入力するデバイスは小型マイコンの Arduino と圧力センサからなり、サイズは 50mm × 50mm × 10mm である (図 5.6)。他にも、あらかじめ用意した独自形式のリズム情報ファイルを読み込み、複数のノードに一斉送信し、同期再生する機能も用意した。

5.4 展示活動と考察

本作品の表現性や利便性について、多くの体験者からのフィードバックを得て考察することを目的とし、展示活動をおこなった。本節では過去に行った展示の概要、展示内容の詳細について述べ、鑑賞者からのフィードバックや展示の際に確認された課題等を考察する。

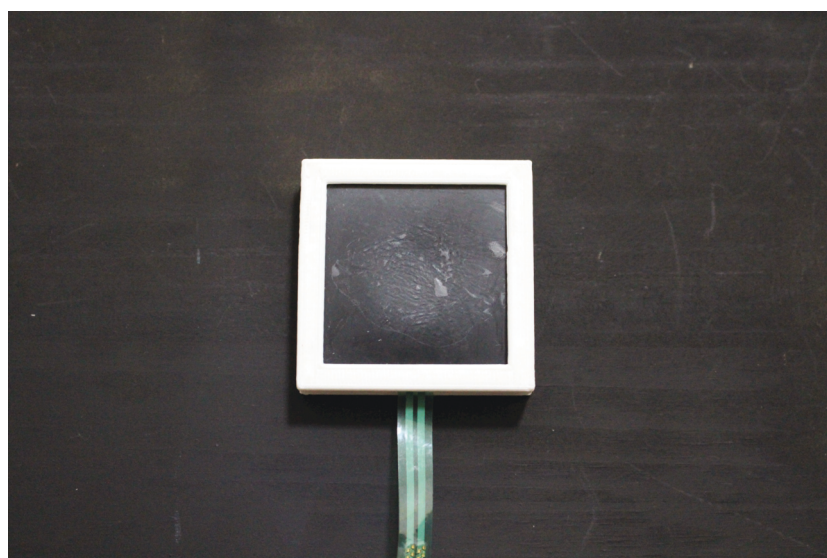


図 5.6 タップ入力センサ

5.4.1 展示の概要

本作品の目指す「演奏者の存在感」という表現性と、リズム情報の記録と再現を簡便に行えるデジタル音楽演奏メディアとしての利便性について、多くの体験者からフィードバックを得て考察することを目的とし、これまで「東京デザインウィーク 2016[15]」、 「SICF18 (Spiral Independent Creators Festival 18)[16]」、 「真夏のデザインフェスタ [17]」の3つの展示イベントにて展示活動を行った。「東京デザインウィーク 2016」は、建築、インテリア、プロダクト、グラフィックなど様々な生活デザインとアートが集まるクリエイティブイベントであり、2016年11月1日から6日の6日間にかけて開催された。「SICF18」は、アート、デザイン、プロダクト、ファッション、映像、音楽など様々なジャンルの若手クリエイターを紹介する公募展形式のアートフェスティバルであり、2017年5月6日と7日の2日間開催された。「真夏のデザインフェスタ」はオリジナルの日用雑貨、工芸品、アクセサリ、絵画、マルチメディア作品などが展示されるアートイベントであり、2017年8月5日と6日の2日間開催された。図 5.7 は実際に展示された作品の様子である。

5.4.2 展示内容

展示のために5体のユビキテルを用意し、そのうち4体をデモリズム音楽演奏用に、残りの1体を体験者によるリズム入力・再生用に設定した。デモリズム音楽は4本のユビキ

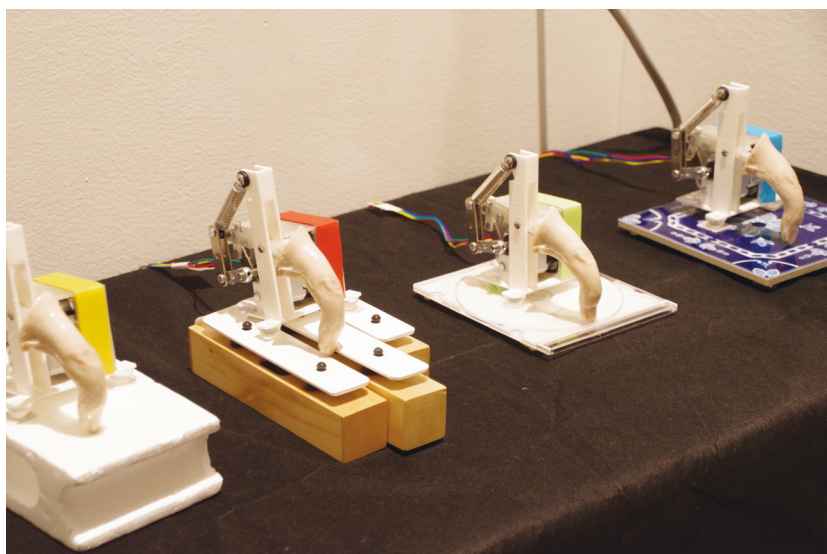


図 5.7 作品展示の様子 (SICF18)

テルによる3分程度の楽曲である。それぞれのノードにはあらかじめ異なるリズム情報が割り当てられ、アンサンブルを奏でる。リズム入力・再生用のノードには、体験者が任意のリズムを記録でき、ユビキテルがそのリズムを再現する。体験者が入力デバイスをタップすると記録が始まり、最後のタップから2秒が経過するとハブがそれまでのリズム情報をノードに送信する。ノード側はこのリズム情報を受信し、繰り返し叩打を続ける。再びユーザからの入力を受信すると、新たなリズムで叩打を続ける。展示内容は上記のとおりで、それぞれのユビキテルに叩打させる素材の組み合わせに若干の違いがあったものの、全ての展示会場において基本的に同一であった。

ユビキテルに叩打させた素材は、以下の5つである。音色が比較的異なる素材を選定基準とした。

- CD ケース (1 辺 13cm)
- アルミ 容器のフタ (直径 5cm)
- 陶製 タイル (1 辺 15cm)
- 玩具の鉄琴
- 発泡スチロール

5.4.3 体験者からのフィードバックと課題

展示中、鑑賞者に対し口頭で作品の意図について説明を行い、一部の鑑賞者はリズムを入力する体験もおこなった。その中で、鑑賞者とリズム入力体験者からコメントや意見を受け取った。

鑑賞者によるコメントは、ポジティブな第一印象を示す感想が多かった。例を挙げると、「シユール」、「すごい」、「見ていて飽きない」、「可愛い」といった意見であった。こうしたコメントから、打楽器演奏を自動で行う玩具等は数多く存在するにもかかわらず、装置がリアルな指の形状をしていることで非現実性が生じ、作品としての強烈な印象を与えていたことがうかがえる。また、複数のユビキテルが同一のリズムで一斉に叩打している瞬間に目を留める鑑賞者が数多く見られ、一斉に叩打する際の連帯感や一体感が鑑賞者にとって印象深く映ったと推察される。一方、他の意見として、「気持ち悪い」という意見も得られた。この意見に関しては、作品のリアリティと深く関係していると考えられる。すなわち、見た目が本物の指と酷似しているため、卓上でリアルな指が動いているという現実とかけ離れた状況に違和感が生じ、「気持ち悪い」という意見に繋がったと考えられる。

リズム情報の記録・再現に関しては、使用方法の説明を受けた多くの体験者が実際にリズムを入力することができた。入力されたリズムを再現するユビキテルを見て驚く体験者が多く、「指の形をした装置が自分自身の行為を真似る」という体験自体が新鮮であったことを示している。また、「可愛い」というコメントからもわかるように、指のリアルな造形や、ユーザが伝えたリズムを受け取り、それを真似しようとするユビキテルの姿に愛着を感じていたことが示唆される。すなわち、あらかじめプログラムされた単なる機械の応答がまるで「生命体の意志」による反応のように感じられ、愛着に繋がっていたとも解釈できる。このように、生命体が音楽を演奏しようとする意志とも言える、「演奏者の存在感」と密接に関わる感覚を呈示できていたことが示唆された。

体験者によって入力されたリズムは、単純なリズムだけでなく細かく連打するリズムや、とても長いリズムなど様々であった。比較的単純なリズムに対してはあまり問題は見られなかったが、中には正確に再現されなかったリズムもあり、演奏行為が反映されると感じられなかった体験者も見られた。ユビキテルが正確にリズムを再現できなかった現象として、途中のリズムが抜け落ちてしまったり、入力者による感覚的な強さとユビキテルの再現する叩打強度に隔たりがあった、これらの現象に対しては以下の原因が考えら

れる。

- 叩打間隔が短すぎてモータ回転速度の限界を超えた。
- センサを叩く位置や叩き方でセンサの感度が変わった。
- 入力されたりズムデータが正しく送信されなかった

ハードウェア上、叩打間隔には限界があり、叩打強度を大きくするにつれて限界叩打間隔も大きくなる。そのため、強弱情報を犠牲にしてリズム情報を優先するなどの妥協策を検討することが必要である。センサの感度に関しても、叩き方や叩く位置によって感度変動しにくいセンシング方法について、より細かな検討が必要である。また、システム全体を通じて挙動が不安定になる場面があり、プログラムの修正を進めていく必要がある。

そのほか、長時間の展示活動中にハードウェアのトラブルもいくつか発生した。主なトラブルの内訳は以下のとおりである。

- 指の関節を曲げるワイヤの切断
- 関節パーツの破損
- ワイヤを引っ張るパーツの破損
- 軟質ウレタン樹脂の劣化、亀裂

ハードウェアのトラブルは基本的に耐久性の問題であり、パーツの材質や形状、その他を改良してゆくことが求められる。

以上を総合すると、体験者からのフィードバックより、指の造形のリアリティやリズム演奏を行う生命体としての存在感、複数装置の合奏による連帯感が呈示できていたことが示唆された。リズム入力は多くの体験者に問題なく実行できたが、リズムの内容によっては正しく再現できていないと感じられる場面があった。また、ハードウェアの耐久性にも問題があり、デバイスのさらなる改良が課題である。

5.4.4 今後の展望

今後の展望としては先述したデバイスの改良に加え、女性や子供、年配者など、より多彩な種類の指を製作し、より演奏者の特徴に沿った存在感やリアリティを伝えられるようにしてゆくことが考えられる。他にも、現在はローカルの Wi-Fi ネットワークでのみ運用しているが、インターネットを通じて様々な遠隔地での演奏を行い、ユビキテルによる音

楽演奏体験を“遍在する擬似身体”の概念へと近づけてゆくことが課題である。

5.5 おわりに

本章では、デジタル音楽演奏メディアの利便性と、演奏者の存在感呈示を両立することを目指し、“環境に遍在する擬似身体”という概念を導入し、演奏者の存在感を呈示するバーチャルフィンガードラマー“ユビキテル”を提案した。さらに本作品の具体的な製作方法について検討を行い、作成した試作品の展示活動を実施した。

展示イベントでの体験者は、リアルな指の形をした装置が卓上で動くという非現実的な光景に対し、強烈な印象を受けていたことが分かった。また、指の造形のリアリティやリズム演奏を行う生命体としての存在感、複数装置の合奏による連帯感が呈示できていたことが示唆された。これより、身体の一部としての物理的実体を持つこと、および演奏動作の模倣が、演奏者の存在感呈示において大きな役割を果たしていたと言える。

今後は様々な種類の指を作成したり、インターネットを通じた遠隔地での演奏などを通じて、“遍在する擬似身体”の実現へ向けてさらなる改良を進めてゆきたい。

参考文献

- [1] 三輪真弘. 音楽とメディア・アート, または, 「録楽」の未来 (RYUICHI SAKAMOTO 坂本龍一). 美術手帖: monthly art magazine, Vol. 69, No. 1053, pp. 88–91, 2017.
- [2] 佐野靖. クリストファー・スモール 著 野澤豊一・西島千尋訳 ミュージックキング. 音楽教育学, Vol. 43, No. 1, pp. 51–52, 2013.
- [3] 青柳龍也, 小坂直敏, 平田圭二, 堀内靖雄, 後藤真孝, 引地孝文, 平野砂峰旅, 松島俊明. コンピュータ音楽-歴史・テクノロジー・アート. 2001.
- [4] 渡辺富夫. 情報技術が支えるアートとコンテンツの世界-Art with Science Science with Art-. 2. 身体性メディアによるメディア芸術創造支援. 情報処理, Vol. 48, No. 12, pp. 1327–1334, 2007.
- [5] 坂本大介, 神田崇行, 小野哲雄, 石黒浩, 萩田紀博. 遠隔存在感メディアとしてのアンドロイド・ロボットの可能性. 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 12, pp. 3729–3738, 2007.
- [6] Mark Weiser. The computer for the 21 st century. *Scientific american*, Vol. 265, No. 3, pp. 94–105, 1991.

- [7] 田中由浩, 佐野明人. 触知覚メカニズムと指・皮膚構造. バイオメカニズム学会誌, Vol. 38, No. 1, pp. 47–52, 2014.
- [8] Kara Reilly. *Automata and mimesis on the stage of theatre history*. Springer, 2011.
- [9] 梶谷誠. オーケストラ楽器の自動演奏 (<小特集> 自動演奏). 日本音響学会誌, Vol. 41, No. 6, pp. 396–401, 1985.
- [10] Shigeki Sugano and Ichiro Kato. WABOT-2: Autonomous robot with dexterous finger-arm—Finger-arm coordination control in keyboard performance. In *Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on*, Vol. 4, pp. 90–97. IEEE, 1987.
- [11] 渡辺富夫. 身体的コミュニケーション技術とその応用. システム/制御/情報, Vol. 49, No. 11, pp. 431–436, 2005.
- [12] 三輪敬之. 5. 場の統合による共存在のコミュニケーション技術 (<小特集> コミュニケーション支援). 電子情報通信学会誌, Vol. 89, No. 3, pp. 218–225, 2006.
- [13] Shuichi Nishio, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. Geminoid: Teleoperated android of an existing person. In *Humanoid robots: new developments*. InTech, 2007.
- [14] 高橋征資, 公文悠人, 竹田周平, 稲見昌彦. ライブビデオストリーミングにおける拍手マシンの用いた拍手の遠隔伝送. 映像情報メディア学会誌, Vol. 66, No. 2, pp. J39–J45, 2012.
- [15] TOKYO DESIGN WEEK 東京デザインウィーク.
<http://tokyodesignweek.jp/> (2017.8.20 閲覧).
- [16] SICF — SPIRAL INDEPENDENT CREATORS FESTIVAL.
<http://www.sicf.jp/> (2017.8.20 閲覧).
- [17] アートイベント デザインフェスタ — Art Event Design Festa — 開催情報.
<http://designfesta.com/about-gakuten/> (2017.8.20 閲覧).

第6章

咀嚼音の遅延フィードバックによるクロスモーダル知覚を用いた食感操作

6.1 はじめに

複数の感覚刺激間の相互作用（クロスモーダル知覚）を利用することによって、体験の拡張を目指したウェアラブルデバイスが盛んに研究されている。特に、食体験は人間にとって最も重要で、かつ五感全てを用いる体験の一つであり、食事の際に感覚刺激を人工的に付加し、食体験を拡張させることを目的としたシステムが数多く報告されている。

中でも、主に視覚情報とのクロスモーダル知覚を応用した例として、鳴海らによる Meta Cookie[1] が挙げられる。このデバイスは、クッキー生地で作った可食 AR マーカを用いて、頭部搭載型ディスプレイ (Head Mounted Display: HMD) 内にチョコクッキーやイチゴクッキーの画像を表示し、クッキーの風味を呈示している。他にも、LED 光源を利用して飲料に色を重畳する手法による味の変化 [2] や、食品の視覚情報と咀嚼音の重畳を用いた食感変化 [3] などが検討されている。このように、食体験の拡張の研究では、味覚や嗅覚といった情報呈示の難しい感覚を、クロスモーダル知覚を応用することで変化させようと試みている。

特に、食事の際に生じる咀嚼音と食感の関係に着目した研究として、Zampini らはポテトチップスの咀嚼音が crispness の知覚に与える影響について実験をおこない、全周波数帯域、または高周波数帯域 (2~20 kHz) の音圧レベルを増幅し、ヘッドホンで呈示した場合に、crispness が上昇することを明らかにしている [4]。また、増田らは、プレッツェルが湿気ているか新鮮かの判断に聴覚情報が利用されていることを実験によって示しており [5]、さらに食品の咀嚼音を咀嚼タイミングに合わせて呈示することで、触覚や体性感覚で評価

できる食品物性の知覚が変化することを示している [6]. 他にも, 小泉らは Zampini らの知見 [4] に基づき, 実際の食事中に会話をしながら使用できる咀嚼音呈示デバイスとして Chewing JOCKEY を提案し, ポテトチップスをより新鮮に, ビスケットをより分厚く知覚させることに成功している [7]. このように, これまで食品の物性によってコントロールされていた食感を, 聴覚情報の重畳によって変化させる手法が検討されている.

こうした食体験の拡張は, 負担の少ないダイエット法や偏食の防止, 咀嚼の促進など様々な形への応用が考えられ, ひいては QOL (Quality of Life, 生活の質) の向上も期待できる. 他にも, このようなアプローチによる食感呈示が可能になれば, すでにある食品の食感を個人の好みに変化させたり, 食品の食感を満足に楽しめない高齢者などへの支援といった応用も考えられる.

一方, 食感のような複数の感覚が相互作用しながら一つの体験として統合されるクロスモーダル知覚において, 感覚刺激間のずれは重要な影響を及ぼす要素の一つと考えられる. そのため, マルチメディア等で呈示される視覚, 聴覚, 触覚情報間のずれの影響についても考察がなされている [8, 9, 10, 11]. 感覚刺激を人工的に付加するウェアラブルデバイスにおいても, 付加される刺激とそれ以外の感覚刺激との間にずれが生じれば, 統合感の喪失や違和感を引き起こすことが想定される. 一方, クロスモーダル知覚では, 感覚刺激間の遅延を利用することによって, 逆に新たな知覚体験が生み出される可能性もある.

そこで本章では, ポテトチップスの咀嚼を遅延させた音に着目し, 咀嚼行為とのずれ, および実際に聴こえる咀嚼音とのずれ, それぞれの知覚について検証する. そして, ポテトチップス咀嚼音の遅延フィードバック呈示によるポテトチップスの食感変化の可能性を明らかにする. 具体的には, ポテトチップスの咀嚼時にヘッドホンから遅延咀嚼音を呈示し, 触覚や力覚といった聴覚以外の感覚とのずれ, および実際の咀嚼音とのずれが知覚される遅延時間の閾値を調査した. さらに, 咀嚼音の遅延フィードバック音を呈示された際のポテトチップスのザクザク感が, 遅延がない場合と比較して向上するかを検証した. 感覚刺激の遅延フィードバックがクロスモーダル知覚へもたらす影響を明らかにできれば, 食感にかぎらず効果的な感覚拡張方法として, ウェアラブルデバイスへの応用も期待できる.

以降, 実験を実施するための手段について検討し, 実験装置, 実験方法の詳細について述べる. その後, 実験結果について考察し, 結論を述べる.

6.2 遅延フィードバックによる食感操作

実際の咀嚼の際に、遅延した咀嚼音が呈示された場合、聴こえる音に変化が起こり、食体験そのものにも変化を及ぼすことが考えられる。本節では、ポテトチップスの食感の変化と咀嚼音の遅延時間の関係に関する実験の実施手段について検討した。

6.2.1 食材の選定

本章では、先行研究 [4, 7] にも用いられており、食感や咀嚼音において特徴的な食材であるポテトチップスを実験に用いることとした。さらに、一口での食べやすさと大きさの均一性の観点から、ブルボンプチポテトうすしお味（図 6.1）を採用した。

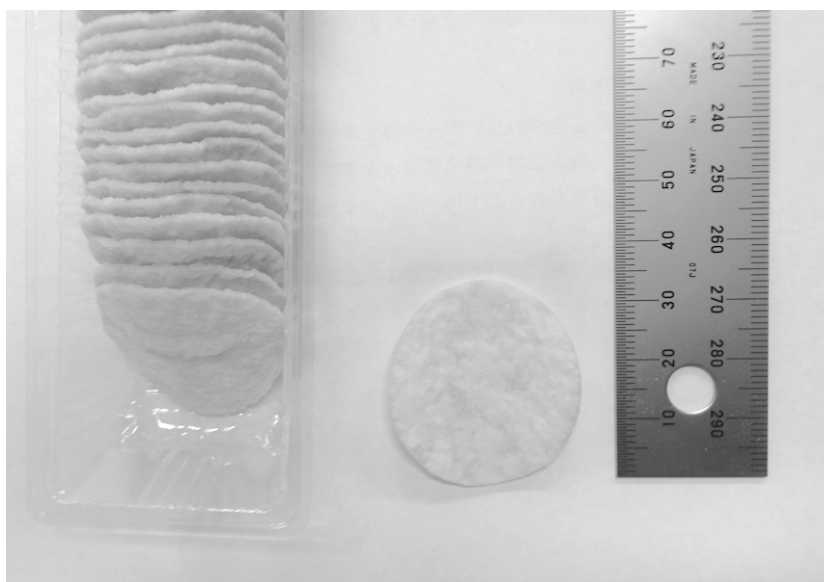


図 6.1 実験で使用したポテトチップス

6.2.2 遅延させた咀嚼音と咀嚼行為とのずれ知覚

ヘッドホンからポテトチップス咀嚼音を遅延させて呈示すると、咀嚼行為との間にずれが知覚され、感覚の統合感の喪失や違和感が起こりうる。そこで本章では、まずポテトチップス咀嚼音の遅延フィードバック音と、咀嚼行為の間で起こるずれが知覚される遅延時間について調査した。また、咀嚼音をヘッドホン等で呈示する場合、呈示音とあわせて実際の咀嚼音も主に骨を伝って聴こえる。そのため、ポテトチップス咀嚼音の遅延フィー

ドバック音と、実際の咀嚼音とのずれが知覚される遅延時間についても調査した。さらに、咀嚼行為、咀嚼音それぞれのずれが知覚される遅延時間についての比較をおこなうこととした。

6.2.3 咀嚼方法

ポテトチップスを奥歯で噛む際と、前歯で噛む際は咀嚼音が異なる。咀嚼中に聞こえる咀嚼音は骨導音と気導音に分かれ、奥歯で食べる際は口を閉じるため、気導音が小さくなり、骨導音が優位になる。一方、前歯で噛む際は口を開けるため、気導音が大きくなり、骨導音との音圧レベル差は小さくなる [12]。この違いは、呈示音とそれ以外の感覚間のずれや食感の知覚にも影響が及ぶと考えられる。そのため、Zampiniらによる実験では、前歯で1回噛んだ音のみに限定して呈示し、前歯で噛んだ時の音と関係性の強い“crispness”という語を用いて食感の変化を評価する手法をとっている [4]。一方、実際の咀嚼では第一大臼歯がもっとも用いられる歯であることが歯学研究で知られており [13]、マナーの観点からも口を閉じて咀嚼するのが一般的である。本章ではこうした実際の咀嚼行動に即し、口を閉じた奥歯での咀嚼に絞って実験をおこなうこととした。

6.2.4 評価語の選定

先述の咀嚼方法によるポテトチップスの食感を評価するために、適当な評価語を選定する必要がある。松井によると、クッキーやクラッカーといったベーカリー製品のもろいこと、サクサクすることを「ショートネス」と呼び [14]、ポテトチップスの食感においてもこれは特徴的な要素と考えられる。また、石橋らは、米菓の食感を表す多くのオノマトペに対して因子分析を行った結果、「パリパリ」、「カリカリ」、「カリッと」などの砕けやすさや乾燥した感じを表す脆性因子、「ザクザク」、「ガリガリ」、「ガリッと」などの、硬い食べ物を噛み砕くような、口腔内の刺激に関する因子、そして「サクサク」のみ高い値を示す、食感の軽快さに関する因子に分けられたと述べている [15]。ポテトチップスも米菓と食感が類似しており、本実験では前歯ではなく奥歯で口を閉じながら咀嚼する方法を取るため、上記のうち口腔内の刺激に関する因子に含まれる評価語を用いるのが妥当だと判断した。したがって、ポテトチップスの食感変化を評価するための語として「ザクザク」感を選定した。

6.3 実験装置

本実験では，咀嚼音を遅延させて出力するシステムが必要となる．ここでは実験の際に使用した実験装置の詳細について説明する．

6.3.1 システム構成

実験装置はコンピュータ (Macbook Air Eirly 2014, OS 10.10), オーディオインターフェース (Avid, Pro Tools MBox), マイクアンプ (audio-technica, AT-MA 2), ヘッドセットからなる (図 6.2). ヘッドセットは本実験用として, イヤホン型マイク (Sony, ECM-TL3) を 3D プリンタで作成した小型アームに取り付け, ヘッドホン (Sony, MDR-CD900ST) の右ハウジング部分に簡易的に固定したもの (図 6.3) である. マイク位置は右頬から約 1cm ほど離れた場所に調整した.

6.3.2 処理の流れ

システム処理の流れは次のとおりである. はじめに, ヘッドセットに取り付けられたマイクによって咀嚼音がマイクアンプに入力される. マイクアンプによって増幅された電気信号はオーディオインターフェースによって A/D 変換される. A/D 変換の量子化ビット数は 16bit, 標本化周波数は 44.1kHz である. A/D 変換された咀嚼音はコンピュータのソフトウェア上で遅延処理を施され, オーディオインターフェースで D/A 変換される. 最後に, 遅延した咀嚼音がヘッドホンから出力される. ソフトウェアには PureData[16] を用いた. なお, このソフトウェア内ではオーディオデータを 64 サンプル単位で処理するため, 実験内で設定する遅延時間には最大で 1.45 ms の誤差が生じる.

6.4 実験方法

実験参加者にポテトチップス咀嚼音を遅延させた音 (以下, 呈示音) を呈示しながら実際に咀嚼させ, 呈示音と咀嚼行為・咀嚼音のそれぞれのずれ知覚を検証する実験と, ポテトチップスのザクザク感の変化を検証する実験を実施した. 実験順序については, 呈示音と咀嚼行為・咀嚼音のそれぞれのずれ知覚を検証する実験を先に実施し, その後でザクザク感の変化を検証する実験を実施した. 以下に各実験で実験参加者に呈示する遅延時間の

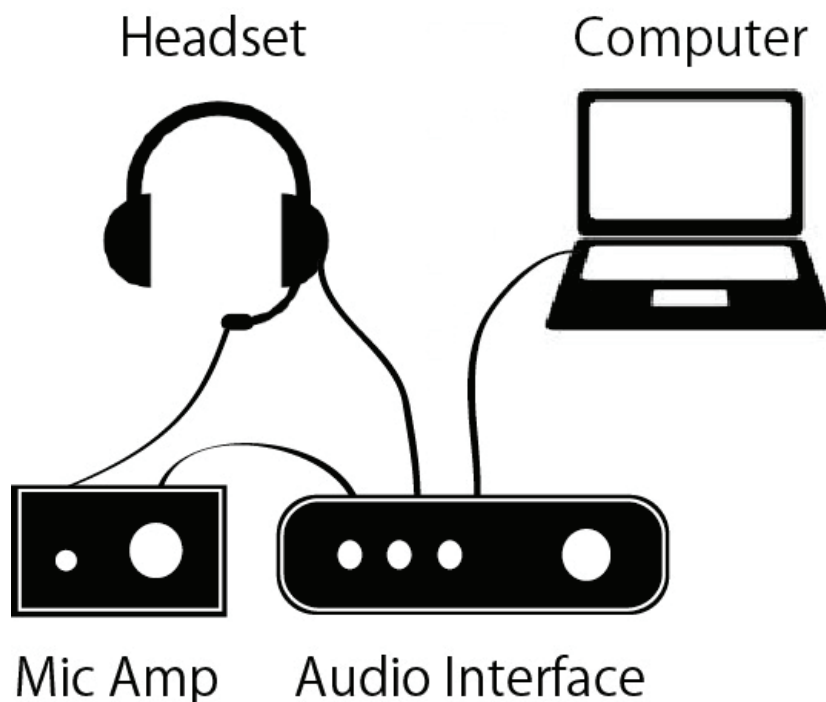


図 6.2 システム構成図

種類と音量の調節，呈示音の周波数特性，咀嚼の流れ，それぞれの実験手順について説明する。

6.4.1 遅延時間の設定

呈示音の遅延時間，呈示数，呈示順は，実験参加者への負担，順序効果，アンカー効果等を総合的に考慮して決められた。ずれ知覚に関する実験では，呈示音の遅延時間を7種類 (50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 ms) に設定し，それぞれ2回ずつ計14回ランダムに呈示しながら咀嚼をさせた。ザクザク感に関する実験では，呈示音の遅延時間を6種類 (25, 50, 75, 100, 150, 200 ms) に設定し，それぞれ2回ずつ計12回ランダムに呈示しながら咀嚼をさせた。

6.4.2 音量の調節

音のずれを知覚する実験を行う上で，ヘッドホンからの呈示音が咀嚼時の実際の骨導音に紛れず，十分に聴取可能な音量になるように呈示音の音量を調節した。十分に聴取可能な音量の目安として，口元で収録した咀嚼音の音量が，耳元で70dB程度の音圧レベルで



図 6.3 ヘッドセット装着時

聞こえるよう，以下の方法をとった．

1. ホワイトノイズをスピーカ（YAMAHA, MSP-7）から再生し，約 1m 離れた騒音計（RION, NL-32）が 70dB を指すようにスピーカの音量を調整する．
2. 騒音計（RION, NL-32）の位置にイヤホン型マイクを置き，ホワイトノイズを収録する．
3. 実験用のヘッドセットで予め収録しておいた咀嚼音信号と RMS（Root Mean Square、最小二乗平均）が一致するホワイトノイズをヘッドホンから再生し，同一のイヤホン型マイクを耳に装着した状態で収録する．
4. 3. で得られた信号の RMS が 2. で得られた信号の RMS と同程度になるようにハードウェアの音量を調節する．

なお，音量調整時に再生する音源として，瞬時的に振幅が変化する咀嚼音信号では調整が難しいため，周波数特性に偏りのない定常波であるホワイトノイズを用いた．また，3. において予め収録しておいた咀嚼音信号の RMS は以下の方法で求めた．

- a. 3 名の協力者に対し，実験時に用いるヘッドセットを用いて実験と同条件で咀嚼さ

せ、口元から約1cm離れたイヤホン型マイクで収録する。

- b. 3名の咀嚼音信号のうち、1咀嚼目のRMSをそれぞれ計算する。
- c. 3名の咀嚼音信号RMSの平均値を求める。

上記の方法で、咀嚼の仕方やマイク位置による誤差はあるものの、基本的に実験参加者に全て同じ音量で遅延フィードバック音を呈示した。なお、実験に用いるヘッドセットにも同一のイヤホン型マイクを用い、マイクアンプの設定も全て同一である。

6.4.3 呈示音の周波数特性

マイク、ヘッドホン、頭部などの周波数特性によって、呈示音と実際の咀嚼時に聴取される気導音とでは周波数特性に違いが生じ、実験結果にも影響が及ぶ。すなわち、両者の周波数特性が著しく異なる場合、実験参加者が呈示音を実際の咀嚼音と同じものと知覚できない可能性がある。そこで、呈示音と実際の咀嚼時に聴取される気導音の周波数特性の違いを比較するために、イヤホン型マイクを用いて口元で収録した咀嚼音信号（以下、口元信号）と、口元信号をスピーカから再生し、耳元に装着したイヤホン型マイクで収録した信号（以下、耳元信号）それぞれの周波数特性を比較した。ここで、実際の咀嚼音を収録するためにスピーカから口元信号を再生する方法をとったのは、実際の咀嚼時に耳元にマイクを装着して収録すると、骨導音が同時に収録されてしまうためである。そのため、耳元信号は実際の咀嚼音と比べると、マイクやスピーカによる周波数特性への影響が加わり、外耳道による周波数特性への影響が無視される。また、口元信号は実際の呈示音と比べるとヘッドホンや外耳道による周波数特性への影響が無視される。

口元・耳元信号の収録手順は以下のとおりである。

1. 実験で用いたヘッドセットを用いて口元の咀嚼音1回を収録する（口元信号）。
2. 収録した口元信号を適度な音量でスピーカ（YAMAHA, MSP-7）から再生する。
3. スピーカから約30cm離れた位置から頭部正面をスピーカに向け、耳に装着したイヤホン型マイクで咀嚼音を収録する（耳元信号）。

ここで、厳密な音量調節はあまり重要でないため、スピーカの音量は聴取時に不快とまらない程度で再生した。また、ポテトチップスの咀嚼と口元、耳元での収録は著者の一人がおこなった。

上記の方法によって得られた2つの咀嚼音信号に対してRMSが一致するよう振幅を調整し、ハニング窓を窓関数としたFFTにより、パワースペクトルを求めた。図6.4はそのパワースペクトルを表している。ここで、縦軸はパワー最大値を基準とした相対レベル、横軸は周波数である。図6.4より、耳元信号の相対レベルの方が約1 kHz以降で若干低い傾向が見られるものの、概ね類似した周波数特性を持っていることが分かる。約1 kHz以降で見られる差の原因は主にスピーカ、頭部、マイクによるものである。

この結果より、呈示音と実際の咀嚼時に聴取される気導音との周波数特性の違いについても、実験参加者が呈示音を実際の咀嚼音と同じものと知覚する上では許容範囲内であると考え、実験を実施した。

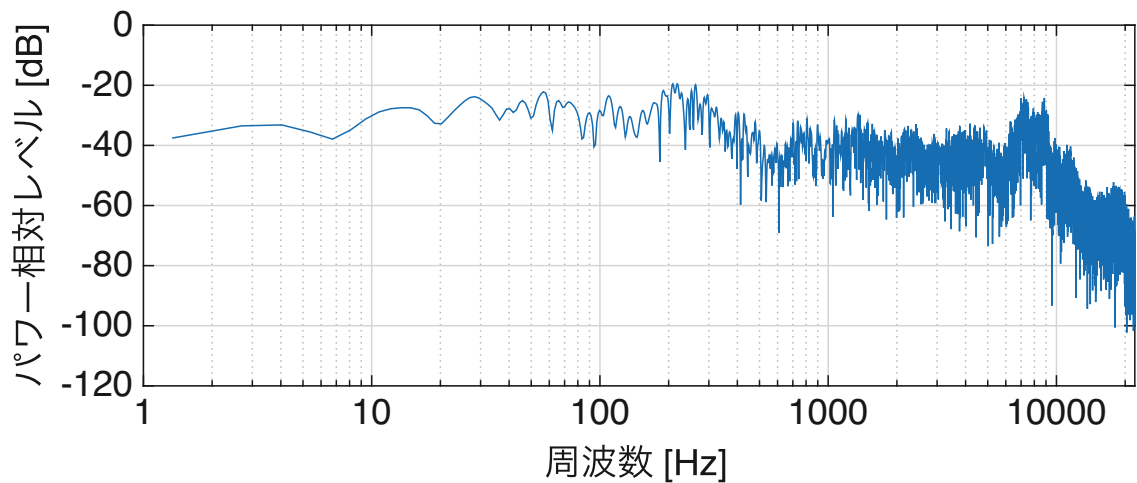
6.4.4 咀嚼の流れ

具体的な咀嚼の流れは次のとおりである。まず実験参加者はポテトチップス1枚を口に入れ、咀嚼を始めずに口を閉じる。その後、ヘッドホンからの出力を始めてから、右奥歯で5回咀嚼し、嚥下させる。5回咀嚼し終わった時点でヘッドホン出力は切られる。嚥下の際、必要に応じて飲料水を口にすることを許可した。ヘッドホン出力の切入は実験参加者の様子を窺いながら著者の一人がおこなった。なお、咀嚼周期は平均して約0.6秒、咀嚼全体の時間は約3秒程度であった。

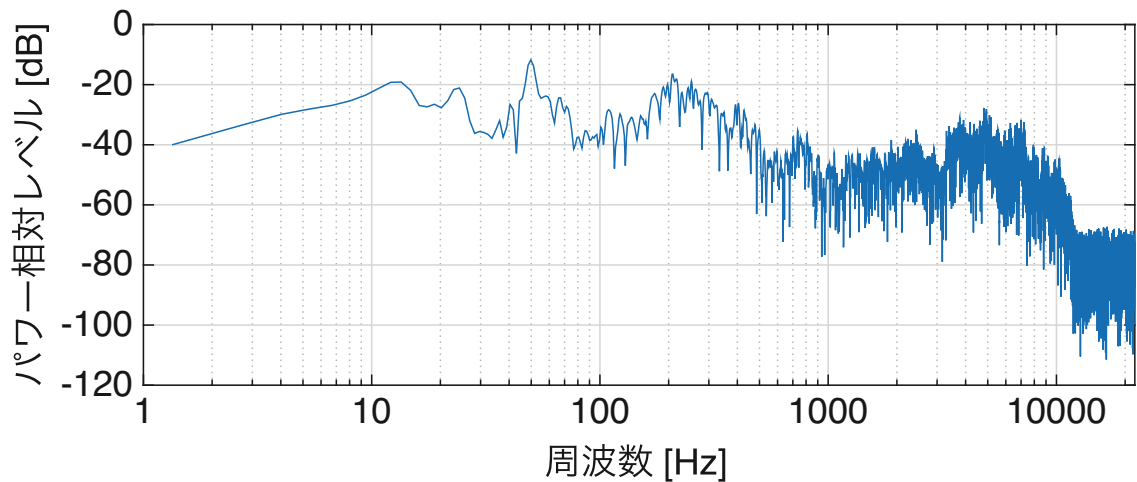
6.4.5 ずれ知覚に関する実験の手順

はじめに、呈示音と実際の咀嚼行為・咀嚼音とのずれの把握を兼ね、実験参加者は500msの遅延時間による咀嚼の練習を1度おこなった。これにより、実際の咀嚼時に聴こえる骨導音とヘッドホンからの呈示音をそれぞれ認識させた。その後、7種類の遅延時間を各2組、合計14の呈示音を聴取しながら咀嚼をさせた。各試行の後、表6.1で示したアンケートに、“はい”か“いいえ”で回答させた。項目1は、聴覚とそれ以外の触覚や力覚といった感覚の間にずれが感じられたかについての質問である。項目2は、聴覚刺激内の、呈示音と実際の咀嚼音の間にずれが感じられたかについての質問である。

なお、実際の咀嚼行為とのずれに関しては実験参加者の解釈が不明確になることが予想されたため、細かな判断方法の教示はせず各自の判断に委ねた。そのうえで、実験後に全ての実験参加者に対しどのような根拠で回答したかについて聞き取りをおこなった。



(a) 口元信号



(b) 耳元信号

図 6.4 咀嚼音信号のパワースペクトル

6.4.6 ザクザク感に関する実験の手順

ザクザク感を評価するための比較基準として、遅延なしの呈示音（以下、呈示音 A）を呈示し咀嚼をさせ、次に遅延ありの呈示音（以下、呈示音 B）を呈示し、咀嚼をさせた。6 種類の遅延時間を各 2 組、合計 12 の呈示音について、上記の試行を繰り返した。呈示音 A は、呈示音 B の前に毎回呈示した。各試行の後、呈示音 A と比較した呈示音 B の聴取時におけるポテトチップスのザクザク感に関するアンケートに回答させた。

アンケートには、表 6.2 で表される 7 段階の評価尺度を用いた。

表 6.1 ずれ知覚に関する実験でのアンケート項目

項目	内容
1	ヘッドホンからの咀嚼音と 実際の咀嚼行為がずれていましたか？
2	ヘッドホンからの咀嚼音と 実際の咀嚼音がずれて聞こえましたか？

表 6.2 ザクザク感に関する実験で用いた評価尺度

点数	評価
3	Bの方がザクザク
2	Bの方がややザクザク
1	Bの方が僅かにザクザク
0	AもBも変わらない
-1	Bの方が僅かにザクザクでない
-2	Bの方がややザクザクでない
-3	Bの方がザクザクでない

6.4.7 実験参加者

実験参加者は健常者の20代男女、合計12名、母国語は全て日本語である。また、実験参加者1名あたりの実験時間は30分ほどであった。

実験参加者数12名のうち、有効な回答が得られたのは10名である。無効とした回答は2名で、理由は以下のとおりである。1名は実験2において、実験参加者がザクザク感という語を日常で使用したり耳にしたことがないため、評価が困難だという申告があったためである。もう1名は、実験2における一部の遅延時間で、2回の評点の間に著しい乖離が見られ、遅延時間とは異なる要因の影響が無視できないと判断したためである。この要因として、咀嚼の仕方やポテトチップスの割れ方、歯にポテトチップスが詰まったことなどが挙げられる。2回の試行間の評点差に関して、この1名のみ2回の試行間の差が5となる結果が含まれたが、10名は2回の試行間の評点差が全て4以内に収まっていた。

6.5 実験結果

本節では、呈示音と実際の咀嚼行為・咀嚼音の間のずれに関する実験と、呈示音によるポテトチップスのザクザク感の変化に関する実験で得られた結果を示す。

6.5.1 呈示音と実際の咀嚼行為・咀嚼音の間のずれ知覚

呈示音と実際の咀嚼行為・咀嚼音とのずれを知覚したかについて“はい”か“いいえ”で回答させたデータから、各遅延時間においてずれを知覚する割合を算出した。

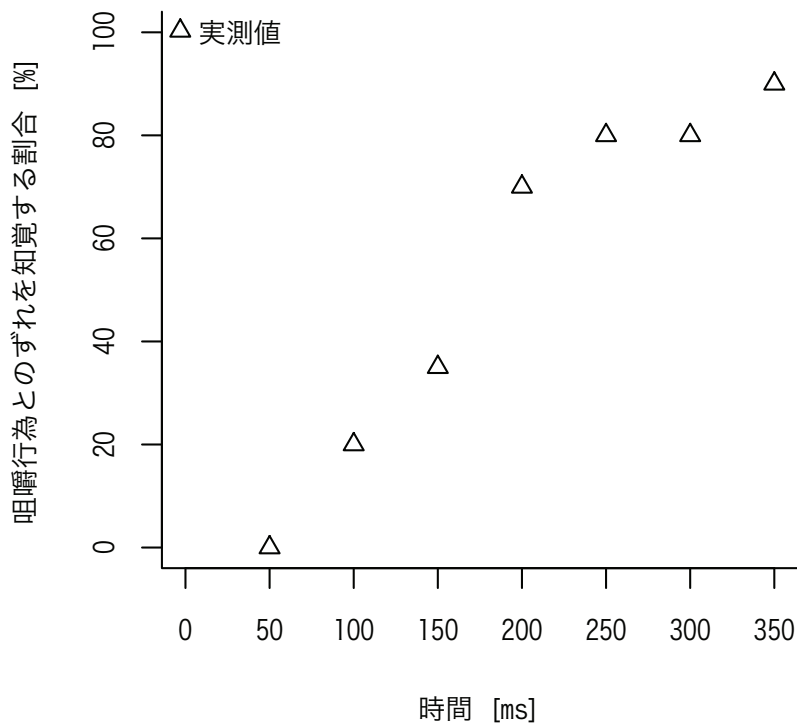


図 6.5 呈示音と咀嚼行為とのずれ知覚

図 6.5 は、呈示音と咀嚼行為とのずれを知覚したと回答した割合を示すグラフである。図 6.5 において、横軸は呈示音の遅延時間 [ms]、縦軸は咀嚼行為とのずれを知覚したと回答した割合 [%] である。図 6.5 より、咀嚼行為とのずれの知覚では、50 ms では全くずれが知覚されていないことが分かる。そこから、遅延時間の増加とともに、ずれを知覚した割合は徐々に増加し、100 ms で 20%、150 ms では 35% であった。さらに 200 ms でやや大きく上昇し、70% であった。そこから徐々に上昇を続け、350 ms で 90% に達し、ほとんどず

れが知覚されていたことが分かる。

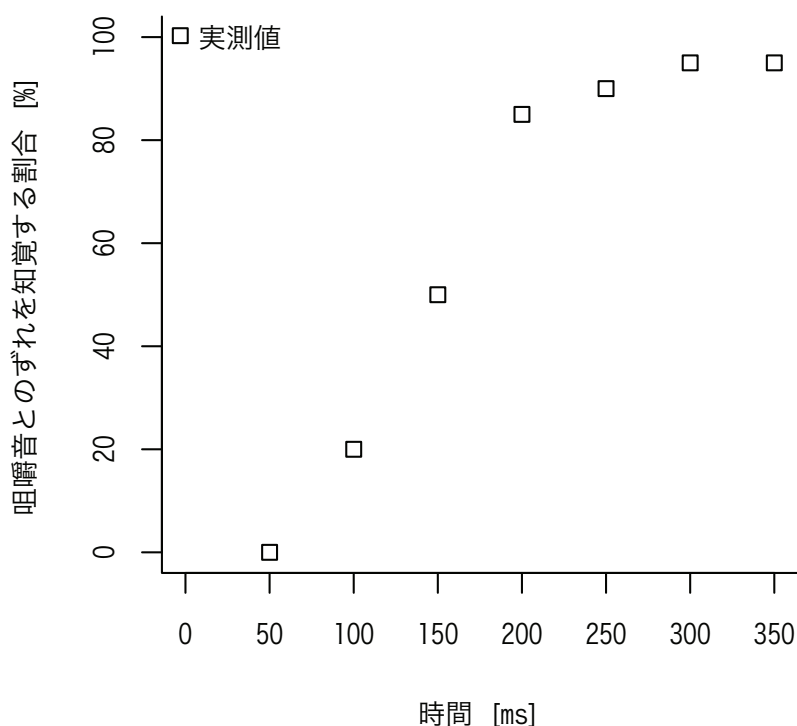


図 6.6 呈示音と実際の咀嚼音とのずれ知覚

図 6.6 は、呈示音と実際の咀嚼音にずれを知覚したと回答した割合を示すグラフである。図 6.6 において、横軸は呈示音の遅延時間 [ms]、縦軸は咀嚼音とのずれを知覚したと回答した割合 [%] である。図 6.6 より、咀嚼音とのずれの知覚では、咀嚼行為と同様、50 ms では全くずれが知覚されていないことが分かる。100 ms においても咀嚼行為と同じ 20% であったが、150 ms では咀嚼行為に比べて高めに増加し、50% となった。さらに 200 ms でも大きく上昇し、80% であった。そこから徐々に上昇を続け、350 ms で 95% に達し、ほとんどずれが知覚されていたことが分かる。

また、得られたデータに対して基本的な心理測定関数として用いられている式 (6.1) のロジスティック関数モデルに基づき [17]、回帰分析を実施した。

$$P(\text{yes}) = \frac{1}{1 + e^{-k(x-m)}} \quad (6.1)$$

ここで、 m はずれが知覚される割合がちょうど 50% となる点を、 k は曲線の傾きを表す定数である。

表 6.3 心理測定関数の推定結果

ずれ対象	咀嚼行為	咀嚼音
m [ms]	186	156
k [ms^{-1}]	0.0172	0.0245

図 6.7 と図 6.8 は回帰分析によって推定された心理測定関数を表すグラフであり、図 6.7 は咀嚼行為とのずれ、図 6.8 は咀嚼音とのずれを表す。また表 6.3 はこの心理測定関数の各パラメータを表している。咀嚼行為、咀嚼音の心理測定関数のパラメータのうち、 m がそれぞれ 186 ms, 156 ms で、 k がそれぞれ 0.0172 ms^{-1} , 0.0245 ms^{-1} となった。この結果から咀嚼行為とのずれを知覚する割合の方が緩やかに上昇し、ずれが知覚される遅延時間はやや遅れていたことが分かる。

呈示音と実際の咀嚼行為とのずれの判断に関する聞き取り結果は以下のとおりである。

- 口を開けたのに音がしたら・・・3名
- ワンテンポずれていたら・・・1名
- 咀嚼した感じとギャップを感じたら・・・1名
- 食べづらく、気持ち悪く感じたら・・・1名
- よく分からず咀嚼音と同じ判断にした・・・4名

聞き取りの結果、咀嚼行為とのずれは下顎運動との不一致（「口を開けたのに音がした」）や呈示音の遅れに対する違和感（「ワンテンポずれ」、「ギャップ」、「気持ち悪さ」）と解釈された。一方、解釈が不明瞭で咀嚼音とのずれと同一とみなした実験参加者もいた。このように、実験参加者が咀嚼行為とのずれをどのように判断するかについて明らかになったものの、こうした判断ポイントのばらつきは実験結果に影響を及ぼす。そのため、事前に具体的な判断ポイントを明示しておく必要があったと言える。

6.5.2 ポテトチップスのザクザク感の変化

実験参加者ごとの咀嚼の不規則さなどを考慮し、実験参加者一人ごとの各遅延時間における評点平均値（以下、ザクザク得点）を算出し、分析を実施した。

図 6.9 は、ザクザク得点の有効回答者の標本平均値と標準誤差を表したグラフである。得点が 0 点であるとき、遅延がない場合と比較してザクザク感が変わらないことを表し

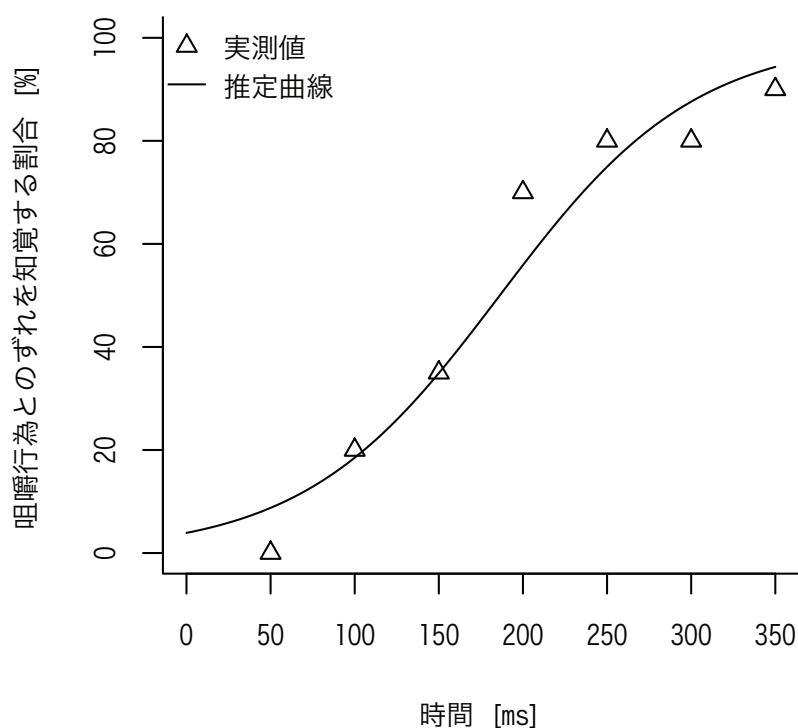


図 6.7 推定された心理測定関数（咀嚼行為とのずれ）

ており，点数が高いほど，遅延のある呈示音を聴取した際のポテトチップスの方がザクザクに感じたことを表す．図 6.9 より，25 ms でのザクザク得点は 0 点に近いが，50～150 ms ではザクザク得点の標本平均値が正の値を示し，ザクザク感が上昇したことが分かる．また，100 ms でザクザク得点の標本平均値が最も高くなったが，150～200 ms では標本平均値が下がりはじめ，分散や標準誤差も大きくなった．これは，150 ms 以降でザクザク感の感じ方に個人差が生じたことが原因と考えられる．そこで，25～200 ms の 6 つの遅延時間におけるザクザク得点の等分散性について Bartlett 検定を行った結果（帰無仮説：6 つの遅延時間におけるザクザク得点の分散に全て差はない），有意差が認められた ($\chi^2 = 12.573$, $df = 5$, $p < 0.05$)．このことから，ザクザク感の感じ方の個人差が遅延時間によって変化していることが支持されている．また，Bonferroni 法による有意水準補正をおこなった上で，各遅延時間の組み合わせに対して，対応のある t 検定を行った結果（帰無仮説：6 つの遅延時間におけるザクザク得点平均値間に全て差はない），25 ms と 100 ms の間に，補正後の有意水準 ($\alpha' = 0.00067$, 補正前 $\alpha = 0.01$) のもとで有意差が認められた．

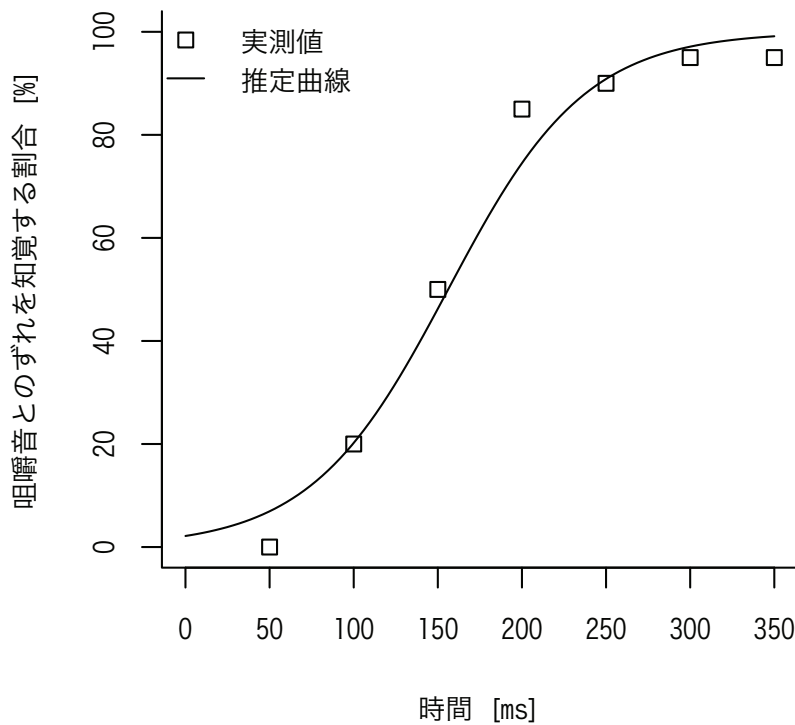


図 6.8 推定された心理測定関数（咀嚼音とのずれ）

6.6 考察

本節では、咀嚼音の遅延提示音と実際の咀嚼行為・咀嚼音の間のずれ知覚の実験結果と、遅延提示音によるポテトチップスのザクザク感の変化の実験結果について考察する。

6.6.1 提示音と実際の咀嚼行為・咀嚼音の間のずれ知覚

実験の結果、図 6.5 に示すように、提示音と咀嚼行為の間のずれを知覚した割合は 200 ms で大きく上昇し、350 ms で 100% 付近に達していた。また、知覚される割合が 50% となる遅延時間は咀嚼行為で 186 ms、咀嚼音で 156 ms となり、咀嚼音とのずれ知覚の割合に比べて、咀嚼行為とのずれ知覚の割合の方が緩やかに上昇し、ずれが知覚される遅延時間はやや遅れていた。

小泉らによると、咀嚼音を提示するにあたって、遅延が感じられる時間について極限法による実験をおこなった結果、ポテトチップスでは平均 162 ms、標準偏差 29 ms となったと報告しており [7]、この値は実際の咀嚼音とのずれを知覚する割合が 50% と推定される

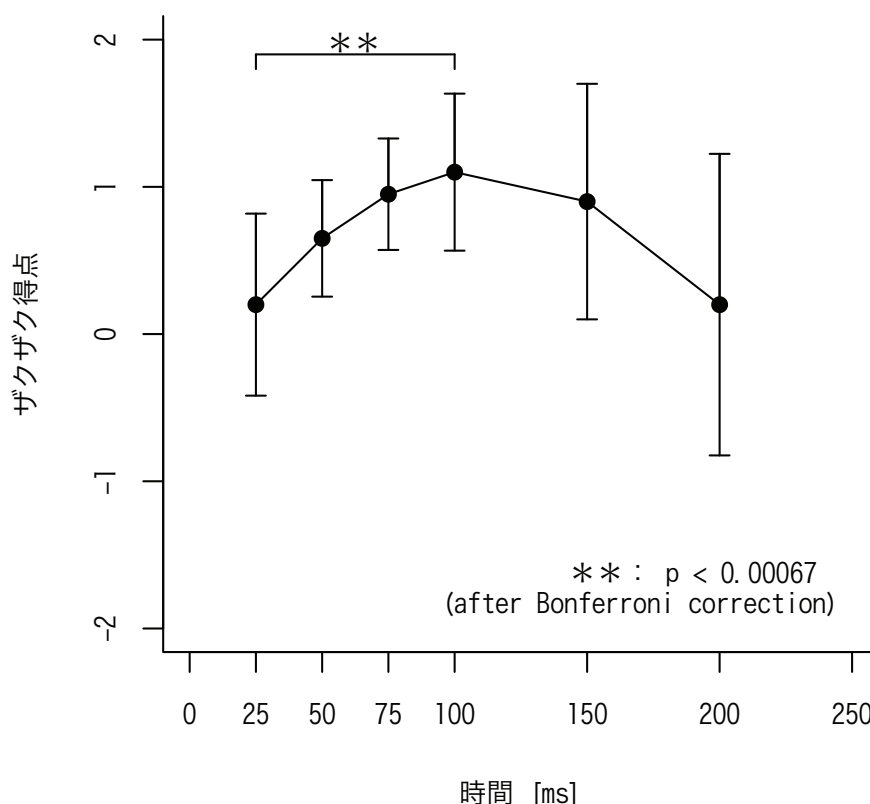


図 6.9 遅延時間とザクザク得点の関係

点である 156 ms (表 6.3) と概ね一致している。また小泉らはこのような値となった原因として、咀嚼音のフィードバック音と実際の咀嚼音の差異を発見しにくく、フィードバック音の発生点を把握することが出来ないために、実際のポテトチップスの破断音とシステムによる呈示音が逐次的と認識されたためと考察している [7]。このように実際の咀嚼音と遅延咀嚼音が類似しているために、100 ms まではひとまとまりの咀嚼音として聞こえ、分離して聞こえる割合はそこから大きく上昇し、150~200 ms の区間では半数以上の割合で分離して聞こえたと考えられる。

これに加えて、咀嚼行為とのずれ知覚の割合の変化に関して、咀嚼運動の観点から考察する。1回の咀嚼サイクルは開口相、閉口相、咬合相の3相からなり [18]、開口相は下顎が閉じて安定した状態（中心咬合位）から下顎運動の垂直方向成分が最大に変位した状態まで、閉口相は下顎運動の垂直方向成分が最大に変位した状態から中心咬合位まで、咬合相は中心咬合位にある状態を指す [19]。田島はピーナッツ、ハム、たくあんを咀嚼する時の咀嚼運動時間について調べた結果、最初の5回の閉口相時間の平均はそれぞれ0.25, 0.20,

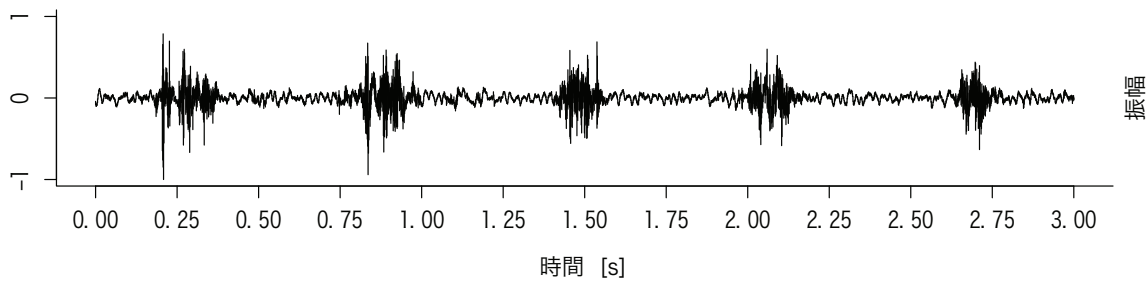


図 6.10 咀嚼音の例

0.22 s, 最初の 5 回の咬合相時間の平均はそれぞれ 0.12, 0.16, 0.14 s であったと報告している [19]. また, 口を閉じる際にポテトチップスが破断されるため, ポテトチップス咀嚼音は主に閉口相で生じると考えられる. 図 6.10 は, ポテトチップスを 5 回咀嚼した時の波形の例である. この波形を見ると, ポテトチップスを奥歯で 1 回咀嚼する際に生じる咀嚼音の長さは次第に短くなっていくが, およそ 200~300 ms の間に収まっており, 先述した閉口相の時間とも概ね共通している.

以上より, 一回の咀嚼における呈示音の持続時間と閉口相時間を 200 ms, ポテトチップス咀嚼時の咬合相を 150 ms 前後とすると, 100 ms 程度の遅延時間では呈示音は閉口相で聞こえ始め, 咬合相の段階で減衰して聞こえなくなる. しかし, 150 ms 以上の遅延時間では呈示音の末尾が咬合相を超えてしまい, 次の開口相に移行しても呈示音が減衰しきらずに聞こえる状態となる. つまり, 口を開けようとしているにもかかわらず, ポテトチップス破断音がまだ聞こえているという不自然な状態が生まれると考えられる. さらに, 遅延が 200 ms を超えると, 呈示音の聞こえ始める瞬間が閉口相を超え, 咬合相や次の開口相の段階に達する. つまり, 噛み終わったのに噛み始めた時の音が聴こえてくるという不自然な状態が生まれると考えられる. これらのことから, 呈示音と咀嚼行為の間のずれを知覚する割合が 150~200 ms で大きく上昇したと考えられる.

さらに, 咀嚼行為とのずれの判断に関する聞き取り結果から, 一部の実験参加者において下顎運動との不一致やそれに起因する違和感が, 実際の咀嚼音とのずれ知覚より後に起こったため, 咀嚼行為とのずれを知覚する遅延時間の方が咀嚼音に比べてやや大きくなったと考えられる. 他にも, 咀嚼行為とのずれを下顎運動との不一致や呈示音の遅れに対する違和感で判断した実験参加者と, 咀嚼音とのずれと同一とみなした実験参加者がおり, 実験参加者間で判断ポイントが分かれた. これにより, 咀嚼行為とのずれを知覚する割合の方が咀嚼音に比べて緩やかに上昇したと考えられる.

6.6.2 ポテトチップスのザクザク感の変化

実験の結果、25 ms でのザクザク得点は 0 点に近いが、50~150 ms ではザクザク得点の標本平均値が正の値を示した。さらに、100 ms でザクザク得点の標本平均値が最も高くなったが、100~200 ms の区間では標本平均値が減少し、分散や標準誤差も次第に大きくなった。

概ね 50~150 ms の区間でザクザク得点が正の値を示した原因として、呈示音が咬合相まで延長し、かつ咀嚼行為・咀嚼音とのずれが知覚されず、咀嚼音がひとまとまりに感じられていたことが考えられる。

100~200 ms の区間でザクザク得点平均値が減少し、分散が次第に大きくなった原因として、咀嚼音・咀嚼行為とのずれ知覚が影響していると考えられる。すなわち、図 6.8 より 100~200 ms の区間で実験参加者は次第に実際の咀嚼とのずれを知覚し始め、特に 150~200 ms の区間では概ね半数以上の割合で咀嚼音とのずれが知覚されており、その知覚がザクザク感の判断に影響を及ぼし、評価が分かれたと考えられる。なお、本実験では呈示音を遅延させていることを実験参加者があらかじめ把握しており、ずれを知覚する実際の遅延時間は実験結果よりも長くなる可能性が高い。また、ザクザク感に関する実験はずれ知覚の実験の後におこなっており、実験参加者は呈示音がずれているかを判断した上でザクザク感について回答した可能性が高い。上記の可能性を考慮しても、咀嚼音・咀嚼行為とのずれを知覚し始める区間と、ザクザク得点平均値が減少し分散が次第に大きくなる区間は概ね重なり合っており、咀嚼音・咀嚼行為とのずれ知覚の影響が示唆される。

また、ザクザク感に関する実験はずれ知覚に関する実験の後におこなったため、音がずれていることがザクザク感にどう影響するかを暗に指示したことになる。そのため、遅延時間以外の要因が無視される傾向があったと考えられる。実際は咀嚼方法やポテトチップスの割れ方等によってもザクザク感は変化するため、ザクザク得点のばらつきが実験結果より大きくなると予想される。

6.6.3 総合考察

以上より、咀嚼音を遅延させるとザクザク感は上昇し、特に 100 ms での効果が最も大きいことが分かった。一方、およそ 150 ms 以降では半数以上の割合で咀嚼行為・咀嚼音とのずれが知覚され始めた。この影響により、ザクザク感に個人差が生じ、一定の効果はみ

られなかった。しかし、50~100 ms では、実験参加者が呈示音のずれをほとんど知覚できていないにもかかわらず、ザクザク感を上昇できたことが言える。Zampiniら [4] による実験とは咀嚼方法も評価語も異なるため、単純に比較することはできないが、適切な遅延時間を設定すれば、音量を上げなくても違和感なくザクザク感に変化をもたらすことができる。そのため、耳への負担が比較的少ない食感拡張方法としての応用や、この効果を用いたウェアラブルデバイスの提案なども期待できる。

6.7 おわりに

本章では、ポテトチップスの咀嚼を遅延させた音と、それ以外の咀嚼行為全体との間で起こるずれの知覚について調査した。その結果、200 ms 以上で多くの実験参加者がずれていると知覚し、ずれを知覚する割合が50%となる遅延時間は、咀嚼行為で186 ms、咀嚼音で156 ms となった。この結果について、咀嚼行為とのずれ知覚には咀嚼運動のうち閉口相、咬合相それぞれの長さと関係があり、身体動作特有の周期や状態遷移にかかる時間が影響することが示唆された。

また、ポテトチップスの食感としてザクザク感の変化について検証し、その結果、100 ms でザクザク感が最も上昇した。さらに、咀嚼行為とのずれが知覚され始めると、実験参加者によってザクザク感の評価が大きく異なる傾向がみられた。一方、50~100 ms ではほとんどずれが知覚されていないにもかかわらず、ザクザク感を上昇できることが示された。以上の結果より、咀嚼音の遅延フィードバックを用いれば、感覚刺激間の統合感を損なわず、ザクザク感を拡張できることが明らかとなった。これより、複数の感覚刺激間に生じる時間のずれがクロスモーダル知覚を引き起こし、感性情報を変化させる要因となることが示された。

この結果を踏まえ、遅延フィードバックによる、耳への負担が比較的少ない食感拡張方法としての応用や、この効果を用いたウェアラブルデバイスの提案なども期待できる。また、感覚間の遅延による様々な体験の変化が明らかになれば、体験拡張デバイスの開発などにも応用できる。

今後の課題として、ポテトチップス以外の食材における遅延時間や、食感の種類についての検証が挙げられる。さらに、食体験以外の様々な体験に対して、遅延フィードバックが効果的な感覚拡張方法として応用可能かについても明らかにしていきたい。

参考文献

- [1] Takuji Narumi, Takashi Kajinami, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Meta cookie. In *ACM SIGGRAPH 2010 Posters*, p. 143. ACM, 2010.
- [2] 鳴海拓志, 佐藤宗彦, 谷川智洋, 廣瀬通孝. 味覚ディスプレイに関する研究 第二報: 飲料への色の重畳を用いたクロスモーダルな味提示手法の評価. 電子情報通信学会技術研究報告. SP, 音声, Vol. 109, No. 375, pp. 311–316, 2010.
- [3] 飯島大地, 小池崇文. 食品の視覚情報と咀嚼音の重畳を用いたクロスモーダル効果による食感変化 (五感メディア, 食メディア, ソーシャルメディア, マルチメディア, 仮想環境基礎, 映像符号化, クラウド, モバイル, ネットワーク, 及びこれらの品質と信頼性, 一般). 電子情報通信学会技術研究報告. IMQ, イメージ・メディア・クオリティ, Vol. 113, No. 468, pp. 83–86, 2014.
- [4] Massimiliano Zampini and Charles Spence. The role of auditory cues in modulating the perceived crispness and staleness of potato chips. *Journal of sensory studies*, Vol. 19, No. 5, pp. 347–363, 2004.
- [5] 増田真実, 山口泰優, 荒井観, 岡嶋克典. 聴覚情報が食品認識に与える影響 (マルチモーダル・感性情報処理の基礎と応用, 一般). 電子情報通信学会技術研究報告. HIP, ヒューマン情報処理, Vol. 108, No. 356, pp. 123–126, 2008.
- [6] 増田真実, 岡嶋克典. 咀嚼音が食感と快・不快度に与える効果 (マルチモーダル, 感性情報処理, 視覚とその応用, 一般). 電子情報通信学会技術研究報告. HIP, ヒューマン情報処理, Vol. 111, No. 283, pp. 57–62, 2011.
- [7] 小泉直也, 田中秀和, 上間裕二, 稲見昌彦. Chewing JOCKEY: 咀嚼音提示を利用した食感拡張装置の検討 (<特集> クロスモーダル/マルチモーダル). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 2, pp. 141–150, 2013.
- [8] 宮里勉, 岸野文郎. 視覚情報と触覚情報の間の遅延知覚に関する主観評価. テレビジョン学会誌, Vol. 49, No. 10, pp. 1353–1356, 1995.
- [9] 西堀佑, 多田幸生, 曾根卓朗. 遅延のある演奏系での遅延の認知に関する実験とその考察. 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS), Vol. 2003, No. 127 (2003-MUS-053), pp. 37–42, 2003.
- [10] 立松綾乃, 石橋豊, 福嶋慶繁, 菅原真司. 力覚メディア・サウンド・ビデオ伝送における

- ネットワーク遅延が QoE に及ぼす影響. 電子情報通信学会技術研究報告. CQ, コミュニケーションクオリティ, Vol. 109, No. 373, pp. 67–72, 2010.
- [11] 河邑壮馬, 木島竜吾. HMD の遅れが人間の平衡に与える影響 (<特集> VR 心理学 6). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 1, pp. 101–108, 2016.
- [12] C Dacremont, B Colas, and F Sauvageot. CONTRIBUTION OF AIR-AND BONE-CONDUCTION TO THE CREATION OF SOUNDS PERCEIVED DURING SENSORY EVALUATION OF FOODS. *Journal of Texture Studies*, Vol. 22, No. 4, pp. 443–456, 1991.
- [13] 河村洋二郎. 口腔生理学. 永末書店, 京都, 1972.
- [14] 松井宣也. 食用油脂とベーカリー製品のショートネス. *Journal of Japan Oil Chemists' Society*, Vol. 19, No. 2, pp. 57–65, 1970.
- [15] 石橋賢, 深瀧創, 宮田一乗. 米菓を対象としたシズル語の印象評価. 人工知能学会論文誌, Vol. 30, No. 1, pp. 229–236, 2015.
- [16] Pure Data - Pd Community Site. <https://puredata.info/>.
- [17] David M Green. A maximum-likelihood method for estimating thresholds in a yes–no task. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 93, No. 4, pp. 2096–2105, 1993.
- [18] 基礎歯科生理学 <第6版>. 医歯薬出版, 東京, 2014.
- [19] 田島直孝. 咀嚼運動に関する運動学および筋電図学的検討. 日本補綴歯科学会雑誌, Vol. 29, No. 2, pp. 355–371, 1985.

第7章

結論

本研究では、誰もがより豊かな感性情報を伝達可能なメディアの実現を目指し、感性情報伝達における身体性に着目した。具体的には、感性情報の表現・受容における身体性を示す概念である「シグニファイア」、「マルチモーダル知覚」、「クロスモーダル知覚」に関する、以下の3つの課題解決へ向けた役割の解明に取り組んだ。

まず、第2章と第3章では、より多くの表現者が円滑にコンテンツを創作可能にする手段として、人工物が持つシグニファイアや感性的特徴に着目し、音楽やインタラクティブアートといった感性情報表現の円滑化に取り組んだ。次に、第4章と第5章では、感性情報の伝達過程における損失を防ぎ、呈示された感性情報が受容者によって適切に復号化されるための手段として、物理的実体をもつオブジェクトの動きや見た目、質感などを利用したマルチモーダルな感覚刺激に着目し、自然の实在感や美、音楽演奏者の存在感といった豊かな感性情報呈示手法の確立に取り組んだ。さらに、第6章では、個人間における感性的基盤の差異を適切に把握し、感性情報を調整する手段として、複数の感覚刺激間の相互作用を誘発するクロスモーダル知覚を応用し、感性情報として食体験における食感を調整する方法の解明に取り組んだ。

第2章では、感性情報の表現として音楽創作の円滑化について論じた。具体的には、ピン、スポイト、ろうとといった道具の持つシグニファイアによって直感的に水を操作できる体験を利用した色水の図形楽譜型メディア「DropNotes」を提案し、評価実験を行なった。その結果、DropNotesでは水を扱う道具のシグニファイアが有効に機能し、スムーズに録音・編集作業を実施することが可能であった。これより、慣れ親しんだ身体動作は音楽情報の操作における認知的負担を軽減し、より簡単に音楽を表現できることを示した。

第3章では、感性情報の表現としてインタラクティブなアート作品創作の円滑化につい

て論じた。具体的には、身の回りに置かれている日用品の持つシグニファイアと感性的特徴を柔軟に再利用，再構成する形で，アート作品を創作するメディア「MITAI」を提案し，MITAIを用いて創作された作品の印象に関して実験を行った。その結果，インタラクティブに音が生成される体験の中で，日用品の持つ感性的特徴が有効に機能し，作品として好印象につながった。これより，人工物とのインタラクションにはシグニファイアだけでなく，そこから連想される様々な感性的特徴が含まれ，それらをアート作品を創作する際のモチーフとして効果的に再利用できる可能性を示した。

以上より，感性情報表現の円滑化に関して，人間の直感的な身体動作を引き起こすシグニファイアは符号化の認知的負担を軽減し，人工物の備えるシグニファイアや感性的特徴を利用することは，インタラクションデザインやアート作品創作の円滑化に有用であったと言える。

第4章では，マルチモーダルな感覚刺激として自然を捉える行為と，その際に感じ取る美や癒しといった感性情報の呈示方法について論じた。具体的には，実際の水の形状制御によって地球上の任意の土地の水循環（蒸発，凝結，降水からなる地球上の水の変化）を表現し，気象状況に含まれる美や癒しといった感性情報を呈示するメディア「霞鈴」を提案し，展示活動を通じて得られた鑑賞者のフィードバックから考察を行った。その結果，本作品が目指した自然の美が，実際の自然をモチーフとしたディスプレイと水の形状変化や草花によるマルチモーダルな感覚刺激を通じて鑑賞者に呈示できていたことが分かった。これより，実在する自然と物理的に類似したマルチモーダルな感覚刺激を呈示することによって，自然の実在感や美，癒しといった感性情報を伝達でき，それには物理的実体を持つオブジェクトを実在する自然の象徴として用いることが有効である可能性を示した。

第5章では，音楽体験における演奏者の存在感の呈示方法について論じた。具体的には，デジタル音楽演奏メディアの利便性と，演奏者の存在感呈示を両立することを目指したバーチャルフィンガードラマー「ユビキテル」を提案し，展示活動を通じて得られた鑑賞者のフィードバックから考察を行った。その結果，指の造形のリアルさと，ユーザが入力したリズムを模倣するインタラクションから「生命体による意志」とも言える感覚を呈示でき，本研究の目指した演奏者の存在感と関連性の深い感性情報を呈示できていたことが分かった。これより，身体の一部としての物理的実体を持つこと，および演奏動作の模倣が，演奏者の存在感として復号化される上で大きな役割を果たしていることが示唆された。

以上より、豊かな感性情報の呈示に関して、物理的実体を持つオブジェクトをインタフェースに用いることで、ユーザは動きや見た目、質感、音といったマルチモーダルな感覚刺激を受容できることから、受容者は従来のデジタルメディアでは表現しきれなかった感性情報を復号化できていたと言える。

第6章では、ポテトチップスを咀嚼する際の食感操作について論じた。具体的には、咀嚼音の遅延による知覚の変化に着目し、咀嚼行為との間で起こるずれの知覚と、ポテトチップスのザクザク感の変化を検証した。その結果、咀嚼音の遅延フィードバックを用いれば感覚刺激間の統合感を損なわず、ザクザク感を拡張できることが明らかとなった。これより、複数の感覚刺激間に生じる時間のずれがクロスモーダル知覚を引き起こし、感性情報を調整する手段となり得ることが示された。

以上より、感性情報の調整に関して、クロスモーダル知覚は有効な手段であることが示され、特に複数の感覚刺激間に生じる時間のずれは、感性情報に重要な影響を及ぼし得ることが実証された。

これらをまとめると、感性情報伝達における身体性に関して、以下の知見が得られた。

1. 感性情報の符号化に関して、人工物の備えるシグニファイアや感性的特徴には、音楽やインタラクティブアート作品創作の円滑化に一定の有用性があることが示された。
2. 感性情報の復号化に関して、物理的実体を持つオブジェクトによるマルチモーダルな感覚刺激は、実在感や美といった有意義な感性情報の復号化に効果的であることが明らかとなった。
3. 感性的基盤に関して、複数の感覚刺激間に生じる時間のずれはクロスモーダル知覚を引き起こし、ユーザが受容する感性情報を調整できることが実証された。

本論文は、誰もがより豊かな感性情報を伝達できる感性情報メディアを実現する上で、解決すべき課題を分類・具体化し、その手がかりとしての身体が持つ役割（身体性）の解明へ向けた一定の成果を得た。これより本論文は、感性情報の伝達という観点から十分に議論されていなかった身体性の意義を、個別の事象を考察することによってさらに明確にした。本論文によって得られた知見は、人々の生活や心を豊かにする技術として社会への貢献が期待でき、誰もがより豊かな感性情報を伝達できる感性情報メディア実現のための方法論をはじめ、感性に関わる表現を支える学問分野の発展に寄与するものと考えている。

謝辞

本論文は、筆者が2013年から2015年まで早稲田大学大学院基幹理工学研究科博士後期課程在籍中に行った研究、同大学基幹理工学部表現工学科助手として2016年まで在任中に行った研究、2017年に東京工芸大学芸術学部インタラクティブメディア学科に勤務しながら行った研究を取りまとめたものです。

まずはじめに、本研究を進めるにあたって様々なご指導を頂いた指導教員の菅野由弘教授に深く感謝します。菅野教授は筆者が表現工学科3年生での研究室配属時から非常に長い間お世話になりました。筆者の研究や作品制作に関し、的確で創造力溢れるアドバイスをいただき、数々の気づきを得ました。また、筆者のやりたいことを第一に考えてくださり、筆者の研究活動、作品制作活動を遂行するための最高の環境を用意してくださいました。

次に、博士論文審査を進める上で副査を快く引き受けてくださった表現工学科の河合隆史教授、及川靖広教授は、筆者の博士論文に細かく目を通してくださり、より良い論文にするための貴重なご意見を下さいました。ここに深く感謝申し上げます。

表現工学科の橋田朋子准教授からは、論文執筆に関して非常に有益なご助言をいただきました。先生のご指導で、本論文の第2章に関する論文が、論文誌に無事採録されることとなりました。ここに深く感謝申し上げます。

表現工学科の山崎芳男研究室に所属していた先輩である後藤理氏からは、筆者が博士後期課程に在学していた時から、研究テーマや論文執筆、学会発表など、あらゆる面で助言を下さり、研究者としての道を歩んでいく上での様々な知恵を授かりました。多忙な中、筆者の研究に関する議論を何度もしてくださったことで、筆者の研究はより深く、意義深いものへととなりました。本当にありがとうございます。

表現工学科の同期で、友人の三枝英一氏とは、修士課程の頃から共同で数々の作品制作を続けてきました。三枝氏の斬新な発想や鋭い視点にいつも驚かされ、大変貴重な刺激を

与えてくれました。本当にありがとうございます。

また本研究に対して様々な意見をくださった菅野研究室の皆様へ感謝します。中には筆者の行っている研究に興味を持ち、菅野研究室の門を叩いた後輩もおり、大変嬉しく思っています。菅野研究室は学生の皆様で成り立っています。今後とも菅野研究室において、音楽をはじめとした感性情報メディア研究が発展してゆくことを切に願っています。

最後に、これまで筆者の研究を陰ながらサポートしてくれた両親、家族に心より感謝します。

研究業績

論文

- 1. 中島武三志, 菅野由弘. ポテトチップスを利用した咀嚼音遅延フィードバックによる食感拡張の検討 (特集 ウェアラブル時代の身体性と VR), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.21 No.4, pp.585-594, 2016.12.
- 2. 中島武三志, 三枝英一, 尾崎雄人, 菅野由弘. DropNotes: 色水を用いたシームレスな録音・編集インタフェース (特集 コンテンツインタラクション), ヒューマンインタフェース学会論文誌 Vol.17 No.1, pp.53-62, 2015.2.

紀要 (査読付)

- 1. 中島武三志. ユビキテル: 演奏者の存在感を提示するバーチャルフィンガードラマー, 東京工芸大学芸術学部紀要「芸術世界」, Vol.24, 2018.3 (掲載決定).

国際会議

- 1. Daisuke Sasaki, Musashi Nakajima, Yoshihiro Kanno. "AQUBE: An Interactive Music Reproduction System for Aquariums", Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction. ACM, pp.512-513, 2017.11.
- 2. Musashi Nakajima, Hidekazu Saegusa, Yuto Ozaki, Yoshihiro Kanno. DropNotes: A Music Composition Interface Utilizing the Combination of Affordances of Tangible Objects., Advances in Computer Entertainment. Springer International Publishing, pp.604-607, 2013.11.

国内会議

- 1. 中島武三志. 霞鈴 -Karin- : 草花鑑賞装置を用いた気象情報提示メディア, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集 2017, pp.401-405, 2017.9.
- 2. 佐々木大輔, 中島武三志, 菅野由弘. 教育展示施設におけるサウンドインタラクショナルシステムの提案, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集, pp.168-173, 2017.9.
- 3. 白井亮人, 中島武三志, 菅野由弘. 視覚及び聴覚刺激によるクロスモーダル現象を利用した力覚の錯覚, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集, pp.184-187, 2017.9.
- 4. 佐々木大輔, 中島武三志, 菅野由弘. 水族館における魚の動きを入力としたリアルタイム音楽生成システムの提案, インタラクティブ発表, インタラクション 2017, 情報処理学会, pp.190-194, 2017.3.
- 5. 寺村南希, 中島武三志, 菅野由弘. 歌唱音声における単音節の出現頻度と加齢による身体的変化の相関性, 音楽音響研究会資料 35.7, pp.7-12, 2017.2.
- 6. 高橋周, 中島武三志, 菅野由弘. 五十音の音色から受ける印象に基づいた言葉のイメージ変換システムの制作, 音楽音響研究会資料 35.5, pp.13-18, 2016.2.
- 7. 中島武三志, 後藤理, 菅野由弘. MITAI: 日常のモノを用いた自由な音楽制作システムの提案, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015 論文集, pp.406-411, 2015.9.
- 8. 中島武三志, 後藤理, 菅野由弘. 音楽演奏システムにおけるオブジェクト同士の手軽なネットワーク構築に関する検討, 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS), 2015.24, pp.1-6, 2015.5.
- 9. 中島武三志, 尾崎雄人, 三枝英一, 菅野由弘. 色水とピンを用いた音楽制作インターフェース「DropNotes」のユーザビリティ評価, 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS), 2013.101, pp.1-6, 2013.12.
- 10. 中島武三志, 三枝英一, 尾崎雄人, 菅野由弘. DropNotes: 実体のアフォーダンスの組み合わせに着目した音楽制作インターフェース, 情報処理学会研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC), pp.1-5, 2013.8.
- 11. 中島武三志, 菅野由弘. 音楽演奏システムの分散ネットワーク化, 情報処理学会研究

報告音楽情報科学 (MUS) 2012.1, pp.1-6, 2012.12.

12. 中島武三志. 空間表現に着目した音楽演奏システム, 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS) 2011.8, pp.1-6, 2011.12.

作品入賞

- 1. 中島武三志, 後藤 理, 三枝英一. 小林茂審査員賞(受賞作品「ユビキテル」), KDCC2017, 西日本工業大学, 2017.3.

作品展示

- 1. 中島武三志. DropNotes, 東京工芸大学 芸術学部フェスタ 2017, 東京工芸大学, 2017.10.
- 2. 中島武三志, 後藤 理, 三枝英一. ユビキテル, 真夏のデザインフェスタ, 東京ビッグサイト, 2017.8.
- 3. 中島武三志, 後藤 理, 三枝英一. ユビキテル, SICF18, SPIRAL, 2017.5.
- 4. 中島武三志, 後藤 理, 三枝英一. ユビキテル, KDCC2017, 西日本工業大学, 2017.3.
- 5. 中島武三志. 霞鈴 -Karin-, 徳島LEDアートフェスティバル2016, 徳島市街地, 2016.12.
- 6. 中島武三志, 後藤 理, 三枝英一. ユビキテル, 東京デザインウィーク 2016, 神宮外苑, 2016.11.
7. 中島武三志. Sound Tiles, インターカレッジコンピュータ音楽コンサート 2012, 東京電機大学, 2012.12.
8. 三枝英一, 中島武三志. Shelltone ～世界の窓枠 あるひとつの形と風景～, インターカレッジコンピュータ音楽コンサート 2012, 東京電機大学, 2012.12.