

Title	センシング技術を利用した音楽インタラクティブシステム
Author(s)	平井, 重行
Citation	大阪大学, 2002, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/1787">https://hdl.handle.net/11094/1787</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

博士学位論文

センシング技術を利用した  
音楽インタラクティブシステム

平井 重行

2002年1月

大阪大学大学院基礎工学研究科  
システム人間系専攻システム科学分野

## 【要約】

ノンバーバルかつマルチモーダルなヒューマンコンピュータインタラクションの研究は、主に視覚メディアを中心としたインタラクションの研究が多く、また技術シーズの提供で留まっているものが多い。本研究は、聴覚メディアの一つである音楽に焦点をあて、実際のニーズに基づいた課題を扱うことで実践的、実用的な音楽インタラクティブシステムの研究を行った。ここではセンシング技術を利用した自然な入力インタフェースの実現に重点を置き、インタラクションの効果の確認、新たな知見の獲得を研究の目的とした。

本論文では、まずインタラクションの形態とインタラクティブシステムの一般的な概念について述べ、特に音楽メディアを扱う場合の特徴についてまとめる。次に、音楽インタラクティブシステムの要素技術についてセンシング技術を中心に説明し、これまでの研究事例を紹介する。そして、本研究で行った3つのシステムの研究について述べる。

その一つめとして、歌唱ピッチ（音高）に関する音痴治療支援システムについて述べる。この研究は音痴治療現場のニーズに基づいて行われ、実際に音痴治療に利用されている。音痴治療に有効とされるピッチマッチ訓練に対し、この研究ではまず音痴のタイプ別にピッチマッチができない原因を音楽的能力の機能モデルを考慮して、各音痴タイプ毎に必要な訓練を整理した。そして、安定したピッチセンシング機能をソフトウェアで実現し、ゲーム性を持たせることで楽しみながら訓練を行えるシステムを開発した。このシステムを用いた音痴治療の臨床結果から、これまで必要だった治療期間が大幅に短縮されることが確認され、ピッチの感覚獲得にも非常に有効という新たな知見が得られた。これによりインタラクティブシステムが音楽能力向上に有効であることを確認した。

二つめの研究として、プロの尺八奏者との共同研究として行ったインタラクティブアート創作システムについて述べる。この研究は、奏者のニーズに基づくインタラクション技術の実現と作品制作・公演を目的としたものである。ここでは、まず演奏ジェスチャをセンシングできる新世代楽器、作品制作を効率よく行うためのソフトウェアツールキットを開発した。次にそれらによりインタラクティブアート創作システムを構築し、実際に作品制作とコンサート活動を行ってきた。これらの実践により、これまでにない新しい音楽表現を実現することができた。また、この研究では作品の評価も含め、演奏者の生理的緊張状態を計測する実験を行った。その結果、奏者の意見と合致する指標変化が確認され、将来的な生理的インタフェースの可能性が示唆された。

三つめは、アメニティ浴室環境の提供という産業ニーズに対し、家庭用浴槽での入浴状態をサウンドとして表現するシステムについて述べる。このシステムは、既存設備である給湯機の水圧センサを利用することで、浴槽内で起こる入浴者の動作を湯水の動きとしてセンシングし、インタラクティブなサウンドとして表現する。これにより、入浴者は自らの動作によるサウンドを楽しみながら入浴できる。また、このシステムは浴室外の人がサウンドを聞くことで入浴状態のモニタリングにも活用できる。被験者実験の結果、楽しんで入浴できること、入浴状態モニタリングが可能なおの両方が確認でき、自然なインタフェースによるアメニティ環境の提供と同時に、入浴モニタリングにも利用できる実用的なシステムを実現した。

以上の三つの研究によって、音楽という聴覚メディアを主に扱うインタラクティブシステムで、センシング技術を利用した自然なインタフェースとそれを利用したインタラクションの有効性を確認した。また、リアルタイムによるインタラクションならではの新たな知見も得られており、インタラクティブシステムの今後の可能性についても示唆する結果が得られた。

## 【目次】

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	2
1.2 本論文の構成	4
第2章 音楽インタラクティブシステム	5
2.1 インタラクションのモデルとスタイル	6
2.2 音楽インタラクティブシステムの特徴と種類	7
2.3 音楽インタラクティブシステムの要素技術と関連研究	9
2.3.1 入力インタフェース部の機器・技術	9
【コンピュータ用入力機器】	9
【楽器入力インタフェース】	9
【トランスデューサ, センサ】	9
【MIDIを扱う汎用デジタイザ】	10
【その他センサ機器, 技術】	11
2.3.2 応答処理部で利用される環境, 技術	11
【プログラミング言語・環境】	12
【インタラクティブシステム用ツール】	13
【応答モデル】	13
2.3.3 出力インタフェース部の機器・技術	14
2.4 音楽インタラクティブシステムの事例	15
【新世代楽器】	15
【ジャムセッションシステム】	17
【ビデオゲーム】	17
【その他の音楽インタラクティブシステム】	17
2.5 本研究における各システムについて	18
第3章 音痴治療支援システム	21
3.1 はじめに	22

3.2	音痴の分類と要因	23
3.3	音痴治療支援システムに必要な機能について	25
3.4	システムの実装	25
3.4.1	システム概要	25
3.4.2	各種機能	26
	【ピッチセンサ】	26
	【目標音の音色選択・発音制御】	28
	【訓練データの作成】	28
3.4.3	各動作モードの説明	28
	【軌跡描画モード】	28
	【ゲームモード】	29
	【トレースモード】	30
3.5	システムを用いた訓練手順と治療例	31
3.5.1	クラス B の例	31
3.5.2	クラス C の例	32
3.5.3	クラス D の例	33
3.5.4	クラス E の例	34
3.5.5	治療例まとめ	35
3.6	第 3 章 まとめ	36

## 第 4 章 新世代楽器によるインタラクティブアート創作システム 37

4.1	はじめに	38
4.2	作品制作環境	38
4.2.1	ハードウェア環境	39
	【汎用デジタイザ ATOM8】	39
	【新世代楽器 Cyber 尺八】	40
4.2.2	ソフトウェア環境	42
	【シーン記述用ツールキット HIAT】	42
	【HIAT を利用した制作手順】	44

4.3	「竹管の宇宙」プロジェクトについて	46
4.3.1	プロジェクトのコンセプトと経緯	45
4.3.2	演奏システム解説	47
4.3.3	作品・演奏解説	49
4.4	生理的緊張状態の計測	52
4.4.1	無線携帯型生体信号計測システム	52
4.5	生理的緊張状態の計測とそれに基づく作品の考察	54
4.5.1	異なる状況における演奏者の生理的緊張状態の比較	57
4.5.2	演奏者の演奏中の生理的緊張状態と内観，作品内容との比較	57
4.6	第4章まとめ	59
<b>第5章 入浴状態を表現するサウンド風呂システム</b>		<b>61</b>
5.1	はじめに	62
5.2	この研究の目的と位置付け	63
5.3	水圧センサによる浴槽内の湯水計測	64
5.3.1	水圧センサ出力の連続計測	64
5.3.2	浴槽内水量と水圧センサ出力との関係	65
5.3.3	イベント毎のセンサ出力の計測	66
5.4	システムの試作	67
5.4.1	システム構成	67
5.4.2	水位データの処理と抽出する制御信号	68
5.4.3	サウンドデザイン	69
5.5	評価と考察	70
5.5.2	入浴中のサウンドに対する被験者の意見	70
5.5.1	入浴状態の把握について	71
5.6	第5章まとめ	72

---

参考文献	.....	77
謝辞	.....	83
研究業績リスト	.....	85

## 第1章 序論

近年、人間の行動に対してインタラクティブな反応を示すロボットが製品として登場するようになり、コンピュータシステムとのコミュニケーションの親和性においても、インタラクションが重要な要素であることが認知されるようになってきた。そこでは、人間の行動をセンシングする技術と、それに対する反応を決定および処理する技術、またマルチメディアによる表現技術の3つが重要な役割を担っている。そして、これらの技術の発展により、インタラクションの効果が期待できる応用分野が広まっている。そのような中で、本研究は「音楽」というメディアに注目してインタラクティブシステムの研究を行った。

本章では、音楽を題材としたインタラクティブシステムの研究を行うにあたっての、関連研究分野の技術的・歴史的背景について述べる。そして本研究の位置付けと目的を説明する。また本論文の構成についても述べる。

## 1.1 本研究の背景

コンピュータ機器やシステムが社会のあらゆるところで導入されていくなか、個々の機器やシステムの能力は日々向上し、その構造や機能も複雑化し続けている。そしてその複雑化に対して「使い勝手」に関する改良が重ねられている。コンピュータの実用化当初は、そのインタフェース（入出力部）にはキーボードと CUI (Character User Interface) のディスプレイしかなかったが、GUI (Graphical User Interface) の登場により「ユーザインタフェース」という言葉が世間でも認知され、その重要性が唱えられるようになった。そして現在、「ユーザインタフェース」という概念は、コンピュータシステムでなくとも、生活用品や家具、建築物など人間が扱うあらゆるものに対して適用される概念となっている。そして、よりよいユーザインタフェースを実現するためには「技術」だけでなく「デザイン」も十分に考慮することが重要とされている。

コンピュータ科学の分野ではユーザインタフェースの研究を総称して「ヒューマンインタフェース」(HI) と呼び、機器操作に関する物理的な技術からコンピュータ上で扱う情報の論理的なデザインまで、幅広い研究が行われている [田村 1998]。ここでは人とコンピュータシステムの間で相互作用的な情報のやりとりを課題とした「ヒューマン・コンピュータ・インタラクション」(以降インタラクション) を扱う研究領域がある。CUI 中心だった時代は、機器の処理能力の制限からデータ量が少なく時間的重要性の低い処理を中心に、主に文字・記号や言語情報を媒介としたインタラクションの研究が行われていた。それが機器の処理能力向上と共に、映像や音響などのマルチメディアデータのリアルタイム処理が可能となり、言語情報でも音声をはじめとするマルチメディアを用いる研究へと発展してきた。しかし、言語情報だけでは人間にとって自然かつ感覚的なインタラクションにはほど遠く、その実現には表情や身体動作、声の抑揚などのノンバーバル（非言語）情報を扱うことが重要な課題となっている [黒川 1994]。また、バーバル、ノンバーバルに限らず複数の情報（モード）を並列的に伝達して統合的に処理するマルチモーダルな処理も重要な課題である。

これらの課題に対する要素技術の研究には、入力インタフェースにおける人間の動作や感覚のセンシング技術の研究や、出力インタフェースのための視聴覚をはじめ触覚などのディスプレイ機器やその情報提示技術の研究が挙げられる。また、システム内部の応答処理技術には、人工知能をはじめとする知識情報処理や感性情報処理 [井口 1994] などが挙げられる。これらの研究分野では、人間の知覚・認知特性を効果的に利用し、知識や感性を取り扱うことでより自然な応答を行うモデルの構築を目的としている。そして、これらの要素技術を利用したインタラクティブシステムを実現する応用研究には、Virtual Reality (VR) [広瀬 1995] をはじめとする Augmented Reality (AR), Mixed Reality (MR) などが代表的なものとして挙げられる。また、Computer Supported Cooperative Work (CSCW) の研究分野でも、人と人のコミュニケーションを目的としたインタラクションに主眼を置いて研究を行っている [石井 1994]。

以上のインタラクション技術の研究の流れをまとめると図 1.1 となる。

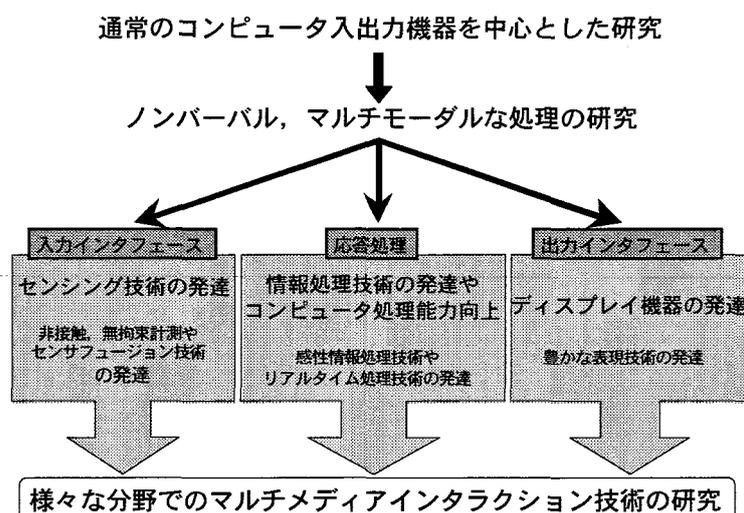


図 1.1 ヒューマンコンピュータインタラクション研究の変遷

現在これらのインタラクティブシステムは、アミューズメントや福祉の他、産業現場での業務用途など、多岐にわたる分野で応用システムの研究が数多く進められている。しかしそれらの多くは視覚メディアが中心に扱われることが多く、聴覚メディアによるインタラクションの有効性、可能性について言及している研究は少ない。そこで本研究では聴覚メディアを主に利用したインタラクションを実現し、その有効性や可能性を確認することを目的とする。そして、聴覚メディアの中でもノンバーバルかつマルチモーダルな情報が重要となる「音楽」メディアに特に注目し、音楽インタラクティブシステムの研究を行った。また、これに際して、技術シーズの提供が先行しインタラクションの実質的な効果まで踏み込んでいる研究が少ないことから、本研究では実際のニーズに基づいた実用的、実践的な音楽インタラクティブシステムを構築し、その音楽インタラクションの実質的な効果を確認することを目的とした。

一方、音楽メディアについては、コンピュータの利用対象として比較的早くから取り組まれており、1950年代から作品制作などが行われている。研究活動としても自動作曲を始めとして楽音合成や分析、楽譜認識、自動採譜、和声解析、演奏の表情付けなど、様々な形でコンピュータが利用されてきた。その背景には、音楽は映像など他の時間連続性のあるメディアと比べてデータ量が少ないこと、他のノンバーバルなメディアに比べて理論的に扱える内容が多いことなどが挙げられる。作品制作においては数学的アルゴリズムの利用や、宇宙からの電磁波など自然現象、人間の脳波が使われるなど、コンピュータに対して常に新しい要素や技術を取り入れて発展してきた分野でもある。また、コンピュータを利用した音楽は、芸術家の自己表現用途だけでなく、カラオケやDTMの普及と共にエンターテインメントやホビー用途として個人でも楽しめる身近な存在になっている。そして、最近ではコンピュータの処理速度の向上と共に現代音楽やクラブミュージックを中心にインタラクティブな音楽環境が注目されるに至っている。だが、これまでの音楽システムは入力機器にコンピュータのマウスやMIDI鍵盤などを利用し

たものも多く、インタラクティブシステムという観点では音楽やその利用形態の発展に比べて入力インタフェースへの取り組みは少ない。そこで、本研究では音楽インタラクティブシステムを構築するにあたり、センシング技術を利用して自然で感覚的な入力インタフェースを実現することに重点を置いた。

以上より、本研究は実際のニーズに基づいた課題に対し、センシング技術を利用した音楽インタラクティブシステムの実現とその実質的効果について確認するものである。そして本論文では、本研究で行った3つの音楽インタラクティブシステムの研究について述べ、それらのインタラクションの効果と共に、リアルタイム処理によるインタラクションならではの知見についても述べる。

## 1.2 本論文の構成

本論文は、第2章にてインタラクションの形態とインタラクティブシステムの一般的な概念について述べ、特に音楽メディアの特徴や目的、研究課題を説明する。また、インタラクティブシステムの構築で使われる要素技術を挙げ、産業分野での応用例も含めた関連システムの研究事例について述べる。そして、第3～5章の各章で述べる3つの音楽インタラクティブシステムの研究について、個々の位置付けと目的の説明を行う。

第3章では、歌唱ピッチ（音高）の音痴に対する治療現場からのニーズに基づいて研究を行った音痴治療支援システムについて述べる。ここでは音痴の分類と訓練手法について考察した内容を述べる。次にシステムの基本機能であるピッチセンシング機能の実装と評価について述べ、インタラクティブに楽しみながら訓練できるシステムについて解説する、そして、それを利用した臨床結果から、その効果や知見について述べる。

第4章では、プロの尺八奏者と共同研究として行ったインタラクティブアート創作システムの研究について述べる。ここでは、作品制作のためのハードウェア、ソフトウェア両環境について、演奏ジェスチャのセンシング機能や作品制作手法などを交えて説明する。そして実際に制作した作品の解説を行う。さらに、この研究では作品演奏中（インタラクション中）の演奏者の生理指標を計測し、生理的緊張感について解析を行ったので、そこで得られた結果や知見についても述べる。

第5章では、インタラクティブなサウンドを楽しみながら入浴できるシステムについて述べる。このシステムは家庭用給湯システムを利用して、浴槽内の湯水の動きからサウンドを生成する。これによりユーザは入浴中のジェスチャなどでインタラクティブなサウンドを楽しめる。また、浴室外の人があるサウンドを聴くことで入浴状態のモニタリングが可能となり、入浴事故早期発見に役立つシステムでもある。ここではこのシステムで利用したセンサとデータ処理、およびサウンドデザインについて説明し、被験者実験の結果からその有効性について述べる。

最後に第6章では、第3～5章で述べた音楽インタラクティブシステムの研究成果を踏まえ、それらから得られた効果と知見を整理する。また、今後の音楽インタラクティブシステムの課題と展望について述べてまとめとする。

## 第2章 音楽インタラクティブシステム

本章では、まず一般的なインタラクションのモデルとスタイルについて述べ、特に音楽を対象とする場合の特徴について説明する。次に、音楽インタラクティブシステムを構築するための要素技術についてまとめる。ここでは、インタラクティブシステムを構成する三つのパート（入力インタフェース部、応答処理部、出力インタフェース部）で使われる機器や要素技術研究についてまとめる。さらに、これまで研究されてきたシステムの研究事例について、代表的なものを4つのカテゴリに分けて説明する。本章の最後では、第3章以降に詳細を述べる本研究のシステムについて、その特徴と位置付けを述べる。

## 2.1 インタラクションのモデルとスタイル

人間同士の直接的なコミュニケーションには言語情報以外のノンバーバル（非言語）情報がたくさん含まれている。イントネーションなどの話し口調や、うなずきなどの身体動作、表情などがそのノンバーバル情報にあたる。人間同士の情報伝達では、半分以上がノンバーバル情報にて伝えられるとも言われており、人とコンピュータの間でもノンバーバル情報が扱えることが望ましいとされている。

一方、これら言語情報や身体動作、表情などの各情報（モード）は並列的に利用されることもコミュニケーションでは重要とされ、それをマルチモーダルインタラクションと呼ぶ。最近のヒューマンコンピュータインタラクションの研究領域においては、以上に述べたノンバーバル情報とマルチモーダルを導入することで、より自然で円滑なインタラクションを目指すものが多い[田村 1998][黒川 1994]。

ここで、コンピュータシステムを介したマルチモーダルインタラクションのモデルを図 2.1 に示す。

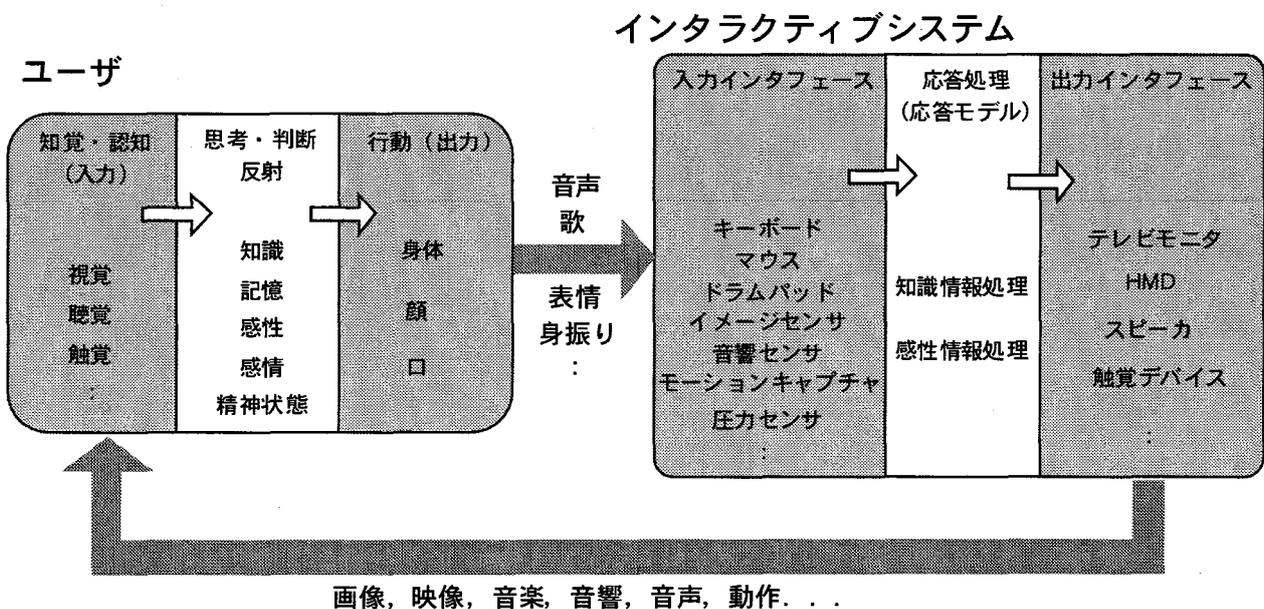


図 2.1 マルチモーダルインタラクションのシステムモデル

図 2.1 では、音声や身振りなどユーザーの行動（出力）は、入力情報としてインタラクティブシステムの入力インターフェース部で捉えられる。場合によってはここで入力に対するポスト処理として知覚や認識の処理まで行う。そしてその入力情報は入力インターフェース部から応答処理部へ送られる。この情報はシンボルデータである場合や、連続量のデータ、時系列データなど様々な場合がある。応答処理部では、知識情報処理や感性情報処理などの技術を用いて、入力に対するシステムの応答を決定する。応答内容は、画像などのシンボリックデータである場合や、映像や音響データの時系列データであることもあ

る。応答処理部によって決定された応答内容に従って、出力インタフェース部は適切な出力データを出力表示する。そして、出力表示されたデータはユーザによって知覚・認知される。そしてユーザは、その知覚・認知された情報を元に思考・判断し、行動を起こす。以上に述べたループがインタラク션을形成する。多くのインタラクティブシステムは、このモデルの形態を取っている。

このモデルに基づいてインタラクティブシステムを構築する場合、システムの目的に対してどのモードを用いてどのようなインタフェースを実現するか、をまず第一に決定する必要がある。この課程はインタラクションデザインと呼ばれ、使われるモードやインタフェースの組み合わせはインタラクションスタイルと呼ばれる。

Shneiderman はインタラクションスタイルを幾つかに分類しており、William らはそのスタイル毎の原則や特性からデザイン方針についてまとめている[ニューマン 1999]。表 2.1 は、William らが8種類のインタラクションスタイルを3つのカテゴリに分けたものである。

表 2.1 インタラクションスタイルと3つのカテゴリ  
(参考文献 [ニューマン 1999] より抜粋)

キーモーダル	直接操作	言語
メニューベースの インタラクション	グラフィカル直接操作	コマンド行による インタラクション
質問応答	書式記入	テキスト表現された自然言語 によるインタラクション
機能キーによる インタラクション		
音声ベースの インタラクション		

しかし、ここで挙げられているインタラクションスタイルは、コマンド行や音声などの手法でコンピュータに対して明示的な指示を与える方法を前提にしている。一方、ノンバーバル情報やマルチモーダルなインタラクションについてはそのスタイル定義は行われていない。音楽を対象とするインタラクションでは、応答のリアルタイム性と連続性が重要視されるほか、音楽という感性的メディア独特の特徴があるため、別途インタラクションスタイルの定義やデザイン方針を考える必要がある。

## 2.2 音楽インタラクティブシステムの特徴と種類

本節では音楽インタラクティブシステム特有の性質について考察する。西洋音楽には和声進行などの音楽理論が存在するが、必ずしもこれを参考に作曲されるわけでもなく、

音楽理論自体が音楽の感性を象徴しているわけではない。そして音楽自体はノンバーバル情報であり、その意図や目的は音楽鑑賞者に抽象的なものとして捉えられる。また、音楽の表現を行う演奏者にとっても、演奏内容の意図や目的は抽象的であることが多く、それを音楽という抽象的な表現方法にて表現していることとなる。このように抽象的なイメージを抽象的な手段で表現するという曖昧さから、音楽はコンピュータ科学分野においては感性情報の代表的なものとして位置付けられている。そして、曖昧さを含む音楽的な処理を行うためには、応答モデルに少なくとも感性情報処理が必要になる。また、音楽は他の感性的メディアと比べて時間連続性とリアルタイム性が重要であり、そのインタラクションデザインやスタイルについても、時間連続性とリアルタイム性を十分に考慮する必要がある。従って、システムの実装には、それらの性質を保持した処理が容易に記述・実装できるソフトウェア環境を利用することが望ましい。

次に、音楽インタラクティブシステムの利用目的と形態について考察する。従来の音楽活動は、「作曲」「編曲」「演奏（歌唱）」「鑑賞」というプロセスを経て成り立っている。（図2.2参照）場合によっては作曲と編曲が同時作業である場合や、ジャズの演奏のように編曲と演奏が同時に行われることもある。それ以外には、音楽的能力向上のため楽器演奏の「練習」や音楽理論の勉強が行われることも多い。

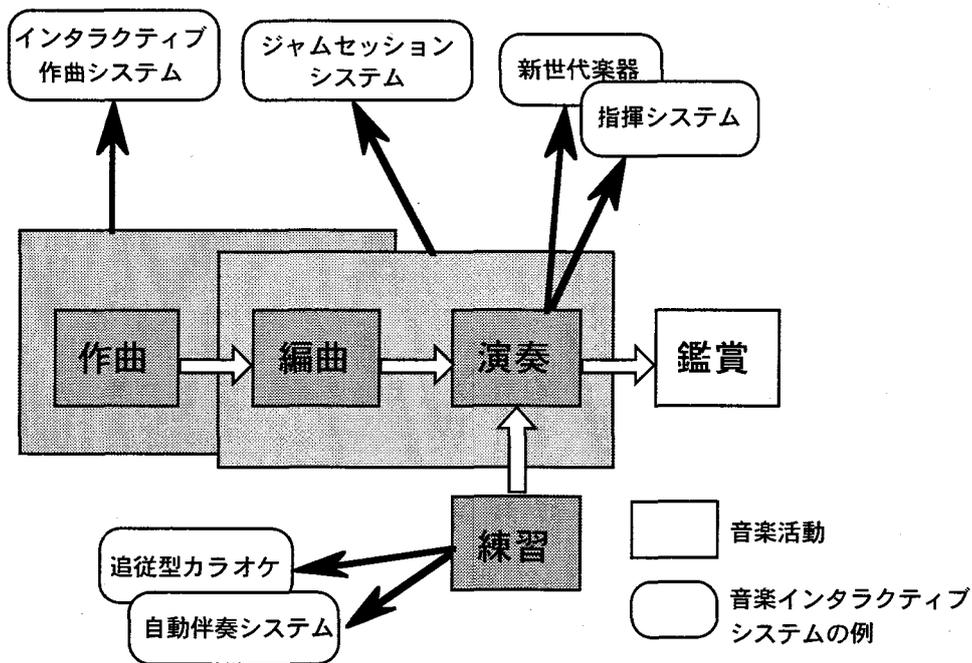


図2.2 音楽活動のプロセスと音楽インタラクティブシステム

ここで、図2.2のグレーで囲った部分が、インタラクションの成立する部分である。「鑑賞」はあくまでも受動的に鑑賞する場合のみを指しており、合奏などの状況で他の演奏者の音を聴く場合は「演奏」に含めている。

「作曲」「編曲」に関するインタラクションについては、インタラクティブ作曲システムというカテゴリで研究が行われている。また、「編曲」「演奏」に関するインタラクティブシステムでは、ジャムセッションシステムが代表的である。「演奏」については、新世代楽器の研究開発が挙げられる。

## 2.3 音楽インタラクティブシステムの要素技術と関連研究

本節では、マルチメディアインタラクティブシステムを構築する際に用いる要素技術や関連研究、既存製品について、システム実装の観点からまとめる。その中でも特に音楽インタラクティブシステムに関わるものを中心に述べる。

### 2.3.1 入力インタフェース部の機器・技術

本節では音楽インタラクションを行う際に用いられる入力機器についていくつかのカテゴリに分けて説明する。

#### 【コンピュータ用入力機器】

コンピュータシステムの基本的な入力機器にはキーボードやマウス、ジョイスティック、タブレットなどがある。このカテゴリの入力機器を利用したインタラクティブシステムの例としては、マウスで音楽の指揮を行うパソコン用ソフトウェア MagicBaton などがある。

これらの入力機器は一般的で実用的なものであるが、音楽インタラクティブシステムという観点では不自然である。自然な入力インタフェースを必要とするアプリケーションで、これらの機器が利用されることはほとんどない。

#### 【楽器インタフェース】

音楽を扱うにおいて、「楽器」が非常に重要な入力機器の一つである。自然な入力インタフェースという観点からも「楽器」は非常に有効であるといえる。MIDI ピアノや電子キーボードなど鍵盤楽器のほか、MIDI ピックアップのついたギターシンセサイザ、ドラムパッドなどが電子楽器として存在し、これら既存の電子楽器は MIDI を利用して比較的容易にコンピュータシステムへの導入することができる。

#### 【センサ類】

前述2つのカテゴリにて述べたような既成の入力インタフェースを利用する以外に、様々なセンシング技術が導入されることも多い。具体的には、電気、磁気、光、半導体などの特性を利用したトランスデューサやセンサが使われる。イメージセンサではデータのポスト処理（画像処理）によって様々なセンシング機能として利用できる。また、

用途によってはこれらを複数組み合わせる用いることもあり、モーションキャプチャシステムのように製品化されているものもある。ここでは、これらすべてを含めてセンシング技術と呼ぶ。新世代楽器では、その触れ方や演奏ジェスチャのセンシングを行うものとして用いられる。その他、指揮システムのジェスチャ入力、インスタレーション作品での環境情報の取得用途として用いることもある [長嶋 1998]。以下表 2.2 にこれらセンサの例を挙げる。

表 2.2 センサ類の例

	センサ種類	計測用途
視覚	イメージセンサ	色, 位置, 距離など
聴覚	音響センサ	音量, ピッチ (音高), 特定音など
その他	磁気センサ	位置, 方向など
	歪みセンサ	振動, 曲げなど
	光センサ	明るさなど
	超音波センサ	位置, 距離など
	圧力センサ	圧力など
	加速度センサ	加速度, 傾斜など
	ジャイロセンサ	角速度, 回転角など
	静電センサ	位置, 距離など
	など. .	

#### 【MIDI を扱う汎用デジタイザ】

センシング技術を利用したインタラクティブシステムを構築する場合、プロトタイプニングの段階でセンサのテストや改良が繰り返されることが多い。特に、前述のトランスデューサ、センサ以外に、呼吸センサや心電計のように特定目的のセンサとして開発されているものを利用する場合やカスタムプロダクトを開発する場合には、センサ素子の駆動や A/D 変換のための電子回路設計および実装は、通常手間のかかる作業となる。従って、これら作業に対する効率化が望まれ、駆動電圧の供給や A/D 変換の汎用機器（汎用デジタイザ）に対するニーズも多い。ここでは音楽用途に限定して A/D 変換後の信号が MIDI 信号として出力される汎用デジタイザの研究と製品を挙げる。各々、新しい楽器の研究やインタラクティブアート作品で利用されている。

- Fish (MIT MediaLab Pardiso らの研究成果) [Paradiso 1997]
- Leider らのデジタイザ [Leider 1997]
- CVM (DIEM の研究成果)
- ATOM8 (LIST の研究成果, 第 4 章で説明)

- SensorLab (STEIM による製品)
- AtoMIC Pro (IRCAM による製品)
- I-CubeX (Infusion Systems 社による製品) [Mulder 1995]

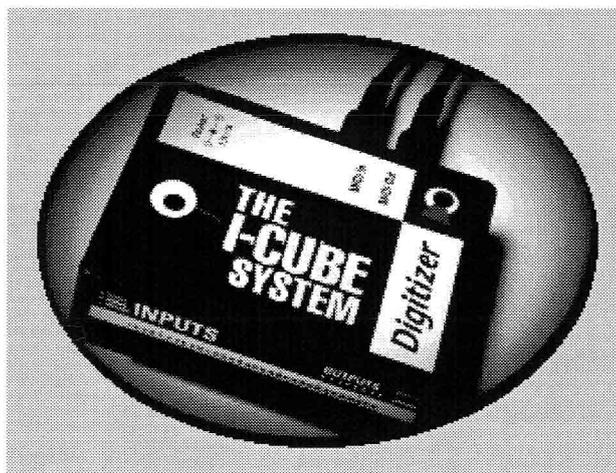


図 2.3 汎用デジタイザの例：I-CubeX  
(Infusion Systems 社 Web ページより抜粋)

#### 【その他センサ機器，技術】

汎用デジタイザではないが MIDI データ出力機能を持ち，幾つかのセンサが利用可能な機器が製品として販売されている．BioMuse（脳波や筋電，心電など生体信号計測）や，YAMAHA 社の MIBURI（専用スーツの肩や肘，手首に設置された曲げセンサによる手腕の動作計測）がそれにあたり，インタラクティブアート作品で利用されている．

その他，あまり音楽インタラクティブシステム向けではないものの，一般のコンピュータ用の A/D 変換機器も場合によっては利用される．また，マルチメディアパソコンのオーディオ入力用 A/D 変換機能を汎用 A/D 変換器として利用する研究も行われている [Hirai 1998]．

### 2.3.2 応答処理部で利用される環境，技術

インタラクティブシステムのコンピュータ内部での処理について，その構築環境から応答処理部として使われるプログラミング環境や技術について説明する．

#### 【プログラミング言語・環境】

リアルタイム性が要求されるインタラクティブシステムを構築するには，入出力インタフェース部との関係を含め，処理速度や時間精度，同期処理などについて十分に考慮する必要がある．つまり，オフライン処理のシステムに，比べてプログラミングの考慮

点が増えることになる。組み込み機器の開発では、既にこれらの点を十分考慮してプログラミングが行われていることから、この点に関する問題はそれほど発生しない。しかし、一般のコンピュータでC言語やBASICなど一般の高級言語を扱う場合、上記の考慮点を満足させながらシステム構築するには、高度なプログラミングスキルが必要となる。また、たとえプログラミングスキルが十分である場合でも、これらの点に注意した開発は非常に時間がかかるものである。そこで2.3.1節の汎用デジタイザと同様に、プログラミング言語でも、汎用性があり作業効率を向上させる環境を使うことが望ましい。外部入力との同期処理などに開発者がそれほど気を使わずともシステム開発ができるプログラミング言語・環境の例を以下に挙げる。これらの多くはGUIベースでプログラミングが可能なビジュアルプログラミングのスタイルを採用している。

<マルチメディア・音楽音響系>

- ・ Max/MSP (Cycling'74 社製品, Macintosh 用)
- ・ Pd (Miller Puckette による研究成果, SGI IRIX, Win32 用)
- ・ jMax (IRCAM の研究成果, Java による Max/FTS)
- ・ Kyma (Symbolic Sound 社製品, 専用 DSP システム制御用)

<計測制御系>

- ・ LabVIEW (National Instruments 社製品)
- ・ MATLAB/SIMULINK (Mathworks 社製品, 信号処理や制御用)

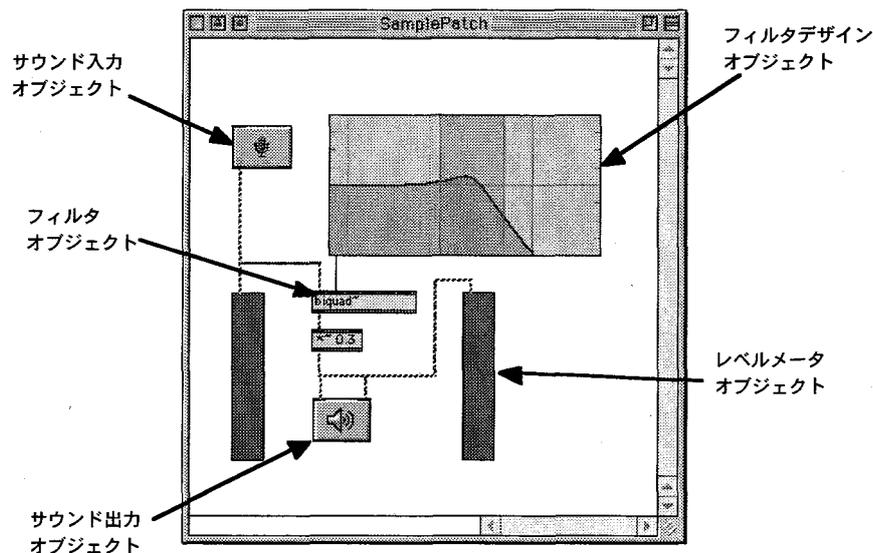


図 2.4 Max/MSP の画面例

以上に挙げた環境では、A/D 変換の制御処理などは予めプログラミング環境の中に取り込まれており、システム開発者が改めて入出力の部分のプログラムを作る必要がない。

信号処理用ライブラリなども豊富に揃っているため、センシング技術のポスト処理や、音響生成なども効率的にプログラミングすることが可能である。また、これらの環境では直感的にプログラミングできるため、音楽家やデザイナーなど必ずしもプログラミング能力に長けていない人でも比較的容易に扱える。このことは、それまで困難であったシステム技術者以外の人との共同作業も可能とし、インタラクティブアート制作のブレイクスルーともなった。

しかし、まだ問題点も残されている。例えばシステムに改良を重ねたり大規模なシステムを開発する場合には、従来のプログラミング言語と同様、システムの設計を十分にすることが必要である。また、ビジュアルプログラミング環境自体に処理負荷がかかるため、処理速度はC言語によるプログラムに比べて多少劣ることもある。

### 【インタラクティブシステム用ツール】

上記のビジュアルプログラミング環境を用いても、複雑な応答モデルの設定やストーリー性のあるシステムを構築する場合には、一からソフトウェアを開発しては効率が悪く、メンテナンス性も低下する。そこで開発効率やメンテナンス性を向上させるため、シーン記述用ツールキットやコンテンツ記述用手法が研究されている。また、複数のコンピュータや機器をまたがった分散環境でのインタラクティブシステムを構築するための研究もある。そこでは、マルチメディアデータやメッセージ処理を行うシステムのための、ネットワークプロトコルが開発されている。

以下にそれらツールとして利用されているものを挙げる。

- ・HIAT (Max 上のシーン記述ツールキット, 第4章で解説)
- ・インターバルスクリプト (センサと出力イベントの関係の記述法) [間瀬 1998]
- ・Lingo (Macromedia 社の Director で用いるスクリプト環境)
- ・SMIL (MPEG4 規格における総合的なメディア制御記述言語)
- ・RMCP (マルチメディア制御用ネットワークプロトコル) [後藤 1999a]

### 【応答モデル】

応答処理部では、入力インタフェース部で入力された情報から、出力を決定する処理を行う。その関係付けを「応答モデル」として設定し、システムの挙動はこのモデルに従うこととなる。システムの要件が比較的単純な場合は、モデルとしても単純となり、入力情報から出力情報への単なるマッピングのみで済むこともある。システムに人間らしい知的なもしくは感性的な応答を求める場合には、応答モデルの構築に知識情報処理や感性情報処理 [井口 1994] がよく利用される。

知識情報処理は人工知能の研究に始まった人間の知識や記憶、論理を扱う情報処理技術である。入力情報そのものや認識処理によって得られた結果から、記憶や論理データベースを用いて論理判断するほか、パターン認識技術などを利用して推論や判断を行う処理である。応答モデルとしては、それら推論、判断の処理に加え、出力とを結びつける処理までが含まれる。音楽インタラクティブシステムでは、セッションシステムで音

楽理論を知識として用いる例がある。青野らによる AdliBand [青野 1999] がそれにあたり、認識された和声から、和声進行の循環点を見つけ、その結果を伴奏の区切りの演奏制御に用いている。

一方、感性情報処理は人間の感覚や主観に基づく情報処理技術であり、その過程や結果で発生する多義性や曖昧性、状況依存性を含めて処理する技術である。場合によっては、知識情報処理とオーバーラップする部分が多々あり、感性情報と知識情報の区別ができない情報もある。例えば、先の AdliBand における伴奏の区切りの演奏などは、人間の感性によって行われてきたものであり、一方ではポピュラー音楽の歴史と共に成熟してきた要素でもある。つまり知識でもあり感性としても扱える情報である。

井口はコンピュータシステムで感性情報を扱う場合のデータの記述形態を、表 2.3 のように4つに分類した [田村 1998]。

表 2.3 感性情報の記述形態

シンボル感性情報	シンボルによる論理記述で表現可能な感性情報
パラメータ感性情報	幾つかの属性により張られる空間において、主観的な基準で決定された位置を領域として表現する情報
パターン感性情報	何らかの感覚によって得られる情報情報だが、その物理的な属性の同定が困難なために「感性」の一言で表現されてきた多次元パターン情報
イメージ感性情報	人間の心にわく心象、心の中ではパターン情報のように視覚的あるいは聴覚的形を持っているが、具象として表現しにくい主観・直感

音楽インタラクティブシステムの中では、ジャムセッションシステムでこれらの感性情報処理が効果的に利用されている。シンボル感性情報の利用例には、金森らのジャズセッションシステム [金森 1995] が挙げられ、和声進行から「安定感」「躍動感」といった形容語情報を抽出し、伴奏制御へ用いることを試みている。

パラメータ感性情報については、和氣らによる JASPER [和氣 1994] で演奏の盛り上がりを表す「テンションパラメータ」や、後藤らによる VirJaSession [後藤 1999b] の「主張度」「主導率」が例として挙げられる。

パターン感性情報については、西嶋らの Neuro-Musician [Nishijima 1992] が挙げられる。この研究ではニューラルネットを利用してジャズのアドリブ演奏のパターンを学習し、人とのジャムセッションを実現している。

イメージ感性情報は、表現記述手法について現在も研究がなされている段階であり、現時点では、ヒューリスティックな処理として実装されることが多い。JASPER や AdliBand であっても、出力演奏部分については応答モデルに基づきデータベースから選択しているが、個々のデータについては予め用意されたものであり、システムで感性情報に基づいて生成されるわけではない。第4章や第5章で述べる研究事例でも、入力

に対する応答にはプロによる作曲された曲やサウンドデザインが適用されており、これらの事例も、イメージ感性情報の分類にあてはまると言える。

### 2.3.3 出力インタフェース部の機器・技術

一般的に、コンピュータを用いたインタラクティブシステムで用いられる出力系の機器は、大きく次の4つに分けられる。

- 1) 視覚ディスプレイ：従来のモニターやヘッドマウントディスプレイ、照明など
- 2) 聴覚ディスプレイ：スピーカやヘッドホン
- 3) 触覚ディスプレイ：PHANTOM や SPIDAR, タクタイルボコーダなど
- 4) 体性感覚ディスプレイ：トレッドミル, ステップマシンなど

この中で1)の視覚ディスプレイと2)の聴覚ディスプレイは手軽に扱えるものであり、これまでの音楽インタラクティブシステムでも多用されている。その他、ビデオゲームなどでは、低音のボディソニックを出力可能な椅子もある。これは、音を物理的振動として表現するためのアクチュエータがシートに備え付けられており、2)の聴覚ディスプレイと3)の触覚ディスプレイが合わさったディスプレイと言える。

また、これらの感覚別カテゴリとは別にシステムの実装という視点では、汎用のD/A機器が要素技術として挙げられる。汎用デジタイザが様々なセンサやトランスデューサを接続するように、汎用D/A機器によって照明などの様々な機器を接続し、コンピュータ側から簡単に制御できるようにするためのものである。音楽インタラクティブシステムで利用されている例としては、2.3.1節で述べたI-CubeXが挙げられるほか、電圧出力で照明制御に利用されるAmericanDJ社のMIDI Pakがある。システムの開発環境にMaxなどを用いる場合には、MIDIで出力信号の制御が可能なこれらの汎用D/A機器は非常に有効である。

## 2.4 音楽インタラクティブシステムの事例

本研究の関連研究として、センシング技術を用いた音楽インタラクティブシステムに位置付けられる研究を採り上げる。以下、幾つかのカテゴリのもとに、主なものを説明する。

### 【新世代楽器】

楽器は音楽を表現する手段としてもっともポピュラーなものだが、見方を変えると、演奏動作と音によるインタラクションを行うシステムと捉えることもできる。また、合

奏のような場面では複数の人同士がインタラクションを行うためのツールとも捉えられる。コンピュータによる処理がないエレクトロニクスだけの時代から様々な新世代楽器が研究されてきた [Roads 1996]。それらの研究は主に3つのカテゴリに分けられる。

伝統的な楽器の場合、本格的な音楽演奏を行うには演奏技法やその表現方法に関する相当の訓練が必要であった。ポピュラー音楽などの音楽が大衆文化として根付くに従い、音楽を聴くだけでなく自ら演奏したいという欲求が増えてきた。そして近年、そのようなニーズに応える製品が発売されており、さらに様々なセンシング技術を利用したおもちゃ的な楽器 [寺田 2001][石川 2000] や、演奏時の抑揚など音楽的表現の制御のみに目的を絞った楽器の研究なども行われている [片寄 1996]。

一方で、プロの音楽家たちには新しい音や新しい楽器のインタフェースに対するニーズがあり、このようなハイエンドなニーズに対する楽器の研究も盛んに行われている。これらはかなり高精度なセンシング技術を用いると同時に高度な楽音合成も行うものが多い。

また、これらの楽器とは別に、生活空間の演出を目的として着衣や部屋にあるものが音を奏でる環境的な楽器や演出の研究も行われている。このような研究ではウェアラブルコンピュータの機能を用いるものや、建築物や家具など生活空間にあるものにセンシング技術を適用してインタラクティブなサウンドを生成するものが多い。

以上に述べた目的別の研究例を次にまとめる。

<手軽に音楽表現を行うための楽器>

- ・ DoublePAD/Bass (PDA のタッチパネルを利用したベースギター) [寺田 2001]
- ・ Two Finger Piano (ボタン2つによるテンポと間の制御) [片寄 1996]
- ・ Play the D.E. (光学センサによる三次元位置計測を利用) [石川 2000]

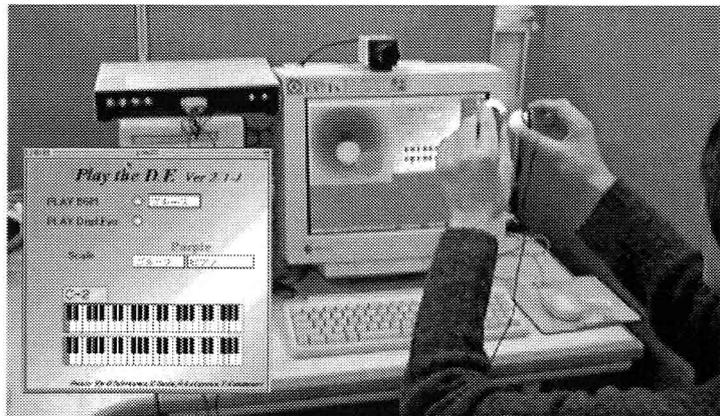


図 2.5 手軽に扱える楽器の例 : Play the D.E.

<新しい音楽表現を行うための楽器>

- ・ VIDEO HARP (ハープの弦に相当するものを光学センサで実装) [Rubine 1988]
- ・ RADIO DRUM (電波を利用し、バトンとパッドとの距離を計測) [Boie 1989]

- ・Tangible Sound (水槽の蛇口や流れる先の水の流量を利用) [米澤 2000]
- ・IAMASCOPE (イメージセンサによる演奏パラメータ抽出) [Fels 1999]
- ・Cyber 尺八 (ジャイロセンサなどによる首振りや尺八姿勢の計測) [金森 1997]

#### <環境的な楽器>

- ・Dance Shoe (靴に仕込んだ加速度センサなどを利用) [Paradiso 1999]
- ・前川らのウェアラブル楽器 (衣服に縫い込んだセンサなどを利用) [前川 2001]

これらの新世代楽器はどれも図2.1 で示したインタラクティブシステムのモデルがアーキテクチャとなっている。これらの研究では、入力インタフェースでのセンシング技術と、その後の内部処理技術が課題として取り組まれている。入力インタフェース部の研究では、楽器として利用を考慮したデザインをベースにセンシング技術の研究が行われている。内部処理の研究では楽音合成手法や、音楽理論などを導入した発音制御などが研究内容となっている。出力インタフェース部については、多くの楽器がスピーカから音響出力することを想定しているため、楽器研究としてはあまり採り上げられない。

#### 【ジャムセッションシステム】

ジャムセッションシステムとは、人間とコンピュータが協調しながらジャズのようなインプロビゼーションを多分に導入した演奏を行うためのシステムである。音楽インタラクティブシステムの中では重要なアプリケーションであり、研究も盛んに行われている。この研究分野では、その代表的なものである Cypher [Rowe 1993] のように入力インタフェースとして従来の MIDI 楽器を用いたものが多い。それゆえ、システムの特徴としては 2.3.2 節で述べた応答モデルにある研究と言える。しかし、中には入力インタフェースにセンシング技術を導入している例もある。青野らの AdliBand [青野 1999] がそれにあたり、ここではピアノ演奏の音響信号より和声認識を行う処理を音響センサとして実現している。そして、認識された和声の進行をセッションに利用している。また、後藤らの VirJaSession [後藤 1999b] は、演奏自体は MIDI ピアノによる入力だが、演奏者のジェスチャをカメラでとらえることで、ソロ演奏の交代合図を認識する。これにより、システムが受け持つ他パートと演奏者が、自然な形でソロ演奏の交代を実現するジャムセッションシステムとなっている。

#### 【ビデオゲーム】

音楽インタラクティブシステムの産業応用の例として、アミューズメント用途のビデオゲームが挙げられる。音楽を BGM ではなくゲームの目的として扱ったゲームが多数発売されている。その中で、コナミ社による一連の音楽シミュレーションゲーム（ビートマニア、ギターフリークス、ドラムマニアなど）は、各楽器の形状をしたゲームコントローラを用いることで、実際の楽器と同様の演奏形態を模倣するゲーム内容となっている。演奏入力には主にボタンスイッチが利用されているが、ギターコントローラのように加速度センサで傾斜角を計測し、ギター演奏のジェスチャ認識に利用するなど本物

に近い操作性を実現しているものもある。また、セガ社のサンバDEアミーゴでは、マラカスコントローラに埋め込まれた赤外線LEDの発光をCCDカメラで捉え、マラカスの位置を計測してゲームの入力インタフェースとしている。これらのゲームではリズム感など実際の音楽的能力も比較的必要とされる。センシング技術によって楽器演奏を模倣する動作とアミューズメント要素をうまく融合させた音楽インタラクティブシステムの例である。

#### 【その他の音楽インタラクティブシステム】

上記のカテゴリに属さない音楽インタラクティブシステムも多数存在する。例えば、加速度センサやジャイロセンサを用いて、自然な指揮の振りを入力する指揮システム[澤田 1996]や、歌うテンポに合わせて伴奏を行う適応型カラオケシステム[大照 1994]、MIDI ピアノなどの演奏に伴奏を付加するシステム[長嶋 1998]など、ユーザによる音楽の演奏や表現を目的としたものが挙げられる。

## 2.5 本研究における各システムについて

本節では、第3章から第5章で述べる各音楽インタラクティブシステムの研究について、その特徴を説明する。また、システムのニーズ、ターゲットユーザ、インタラクションスタイルの観点から各システムの位置付けも説明する。これに関して各システムにおけるインタラクションスタイルを表2.4にまとめる。また、図2.2の音楽活動に関して、各事例の位置付けを図2.6に示す。さらに、図2.7各システムに対するターゲットユーザの位置付けを示す。

#### 【第3章 音痴治療支援システム】

この研究は、歌唱ピッチ（音高）に関する音痴治療のニーズに基づいて行われた。ターゲットユーザは音痴の人であるため、音楽的能力は比較的低いと言える。ただし、音痴訓練を自ら行うということは、音楽に対する自主性は高いともいえ、ユーザの位置付けは図2.7に示すようになる。音楽活動では「練習」部分に位置付けられ、音楽能力向上のためのシステムであるといえる（図2.6参照）。

システムの目的は、音痴のタイプ毎に用意された訓練を実施し、ピッチの発声能力を高めることである。入力インタフェース部はユーザの発声ピッチをセンシングする機能を持つ。訓練ではピッチをビジュアルフィードバックすることを基本とし、応答処理には特に感性情報処理などは用いていない。その代わりに、ユーザの音楽的能力に関する分析は詳細に行っており、それを元にした応答処理部の仕様となっている。応答処理部の具体的な内容は、ピッチの物理パラメータを用いて画面表示の制御を行うほか、ゲームとしての画面制御や判定処理を行う。入力が歌唱音声、出力がグラフィクスというインタラクションスタイルを持つシステムである。

【第4章 インタラクティブアート創作システム】

この研究は、プロの尺八演奏家との共同研究という形で進められ、新しい音楽表現に対するニーズのもとで行われた。システムはコンピュータ音楽作品を制作・演奏するための環境であり、音楽活動における「作曲」「編曲」「演奏」までをカバーするものである（図2.6参照）。ターゲットユーザは作曲家、演奏家である。ここでは新世代楽器に「Cyber 尺八」を開発し、それをを用いた作品を創作するので、ユーザは具体的には尺八曲の作曲者および尺八演奏家となる。両者ともプロレベルのスキルを要するため、ユーザの位置付けは図2.7のようになる。作曲システムとしては、開発したインタラクティブアート向けツールキット「HIAT」を用いる。また、演奏システムとしては演奏ジェスチャを計測できる新世代楽器「Cyber 尺八」を利用する。この演奏システムでは、入力が演奏ジェスチャと尺八の音響、出力が楽音および映像というインタラクションスタイルとなっている。

【第5章 インタラクティブサウンド風呂システム】

この研究はアメニティ浴室空間を提供するという産業ニーズのもとで行われた。システムとしては入浴者によって起こされる浴槽の湯水の動きをサウンドとして表現するものである。そして、インタラクティブに生成されるサウンドで楽しみながら入浴できるアメニティ環境を提供する。また、このサウンドを音響ディスプレイシステムとして利用することで、浴室外の人が入浴事故防止のためのモニタリングシステムにも利用できる実用的なシステムでもある。メインのターゲットユーザは入浴者であるが、日常生活の入浴行為中に利用されるシステムであるため、特に音楽的自主性は高くないと言える。また音楽的能力も特に必要ないため、ユーザの位置付けは図2.7のようになる。音楽活動との関係について、メインターゲットユーザに関しては「演奏」にあたるが、浴室外でサウンドを聴くサブターゲットユーザに関しては単なる「鑑賞」となるため、図2.6のようなシステムの位置付けとなる。インタラクションスタイルについては、入力動作による湯水の動き、出力が環境音および楽音という形態となる。

表 2.4 本研究における各システムのインタラクションスタイル

	調子外れ 治療支援システム	インタラクティブアート 創作システム	インタラクティブ サウンド風呂システム
入力モード	歌唱ピッチ, パワー	楽音 演奏ジェスチャ	ジェスチャ
応答処理 応答モデル	ピッチ, パワーの視覚化	イメージ感性情報処理 (作曲によるインタラクシ ョンデザイン)	<イメージ感性情報処理> (サウンドデザインによる インタラクションデザイン)
出力モード	楽音ピッチ, ピッチ高さ及びパワーの グラフィカル表示	楽音, 映像	環境音, 楽音

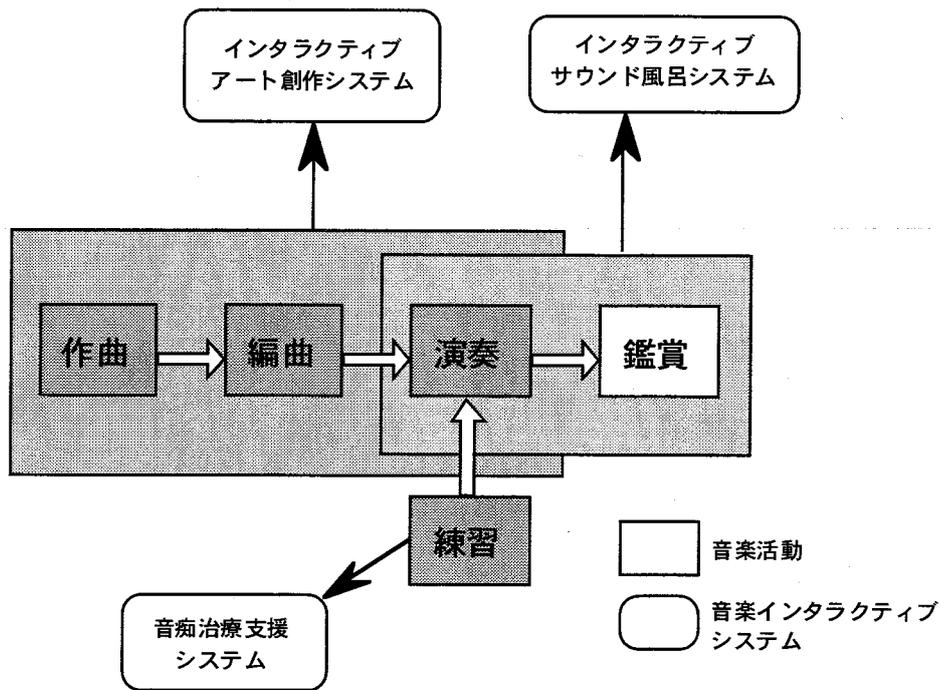


図 2.6 本研究における各システムの位置付け

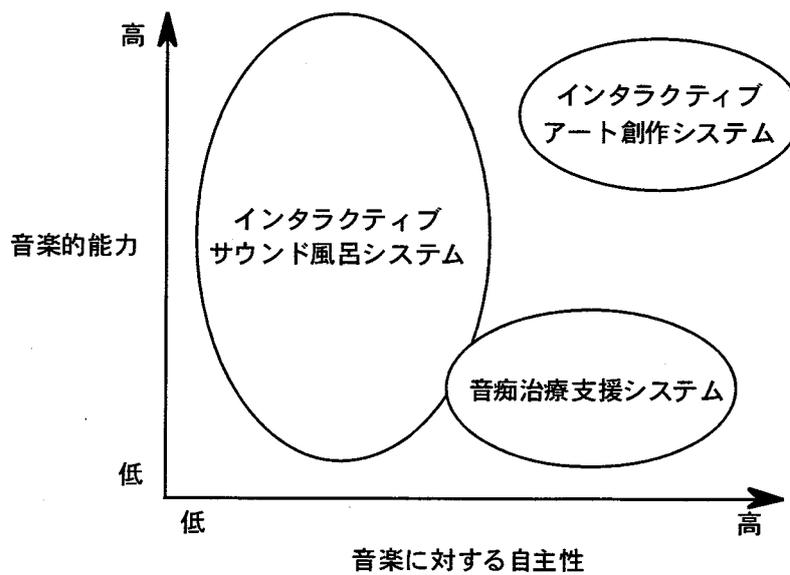


図 2.7 各システムのターゲットユーザの位置付け

### 第3章 音痴治療支援システム

本章は、歌唱のピッチ（音高）に関して音痴な人を対象とした治療支援システムについて述べる。この研究は音痴治療現場のニーズに基づいて行われ、まず音痴のタイプ別にその原因となりうる聴覚－発声機能のモデル化を行った。次にこのモデルに基づく各タイプ毎の治療法を整理し、その治療支援を行うシステム VSG (Voice Shoothing Game)を開発した。また、これに伴い歌声のピッチセンシングをリアルタイムで行う機能もソフトウェアで実現した。VSGを用いたインタラクティブな訓練により、個々の訓練でこれまで必要だった治療期間が、このシステムを使用することで大幅に短縮されることが確認できた。人の音楽能力向上や改善を支援するインタラクティブシステムである。

注) 本論文では歌唱のピッチがうまく制御できない人を「音痴」という言葉で表現している。この言葉は表現に問題があると思われ、本来ならば「調子外れ」などの言葉を用いるべきである。ここでは、一般的にわかりやすい表現を行うという主旨のもと、敢えてこの言葉を使っている。

### 3.1 はじめに

歌う際に音の高さ(ピッチ)に関して音痴である人の存在は、音楽教育者達の間で重要な問題であるとしばしば指摘されてきた [村尾 1992][村尾 1995]. カラオケが世界的に広まり一般的に歌を歌う機会が増えるに伴って、音痴治療に対するニーズも増えてきている. ピッチ, 音量, リズムのうちピッチに関する音痴が一番問題とされ, その原因についてはいろいろ議論がなされている [Roberts 1975][Porter 1977][Geringer 1983][Stauffer 1986]. 様々な調査の結果, ピッチの識別能力の悪さだけが原因ではなく, 社会的な問題や生活環境の問題等も絡んでいると考えられている [村尾 1995]. しかし大抵の人は発話時のアクセントやピッチ, 話速等の制御ができることから, 機能的には音痴のほとんどが治療可能と言われている [Romaine 1961][Gould 1969]. 治療方法の研究としては米沢らの研究 [米沢 1988] や Yarbrough らの研究 [Yarbrough 1992] 等が挙げられ, それらでは提示された目標音と同じピッチの音を発声する「ピッチマッチ」の訓練を行うことが治療に有効としており, 現在行われている治療もこの方法を基本としているものが多い. また, Jones [Jones 1979] によって視覚フィードバックを利用するピッチマッチが提案され, Howard と Welch によって Atari 上で動作するシステム SINGAD [Howard 1987] が開発された. このシステムでは入力音声と目標音とのピッチの差が時系列データとしてユーザへ視覚的に提示 (Voice Shooting 機能) され, 視覚フィードバックを伴ったピッチマッチ訓練の有効性が示された. しかし SINGAD はピッチ抽出が不安定, 目標ピッチのガイド音が鳴らない, 訓練データの自由な設定ができない等の問題があった. また, 現在発売されている PC 上で動作しないことから, 既に使用し難いシステムだと言える. そこで, 現在利用可能な PC 上で, SINGAD の基本機能に音痴治療支援としてより有効な機能を加え, ゲーム感覚で利用できるシステム Voice Shooting Game (以下 VSG) [片寄 1995][片寄 1997] を開発した. このシステムは音痴のカウンセラーによって実際に治療の現場で利用されている.

VSG と同種のシステムや研究例としては, PC 用システムのソング頼太やカラオケにアミューズメント機能を盛り込んだセガカラ, アーケードゲームのドリームオーディション, 江原らの言語障害者用の発声発話訓練システム [江原 1997] 等が挙げられる. これらはいずれも声のピッチ情報をユーザへフィードバックする機能を持つが, 特に音痴治療のためのシステムではない.

この章では VSG の機能や効果についてまとめる. 3.2 節で「音痴」の実態を述べた上で数種類のタイプに分類し, 治療支援に必要な機能について述べる. 3.3 節で治療支援システム VSG の実装に関して述べた後, 3.4 節で VSG を用いた治療例を挙げる.

なお, この章では, 「音程」は連続的に発声する 2 音の音階差を指すこととする.

### 3.2 音痴の分類と要因

音痴の要因に関し、米沢らは旋律を発声で再現する際の機能的制御モデルについて述べている[米沢 1988]。ここではピッチの認知・理解・記憶に関する感覚性によるものと、歌として発声する際の運動性によるものとに大別されるとしている。また、村尾らは日本における音痴の実態調査を行った結果、様々な症状を表 3.1 のクラスに分け、要因について考察している[村尾 1995]。そこで、それら要因とピッチマッチを行う機能の制御モデルを考慮し直すと、図 3.1 のようになると考えられる。

表 3.1 音痴のクラス (参考文献[村尾 1995]より抜粋)

A	ほぼ正確に歌うことができる。
B	旋律の大部分の音程は正しいが、しばしば上ずったり、下がったり、調子外れになることがある。
C	自分の好きな高さ(調)で一人で歌っている時は、旋律がそれと分かる程度の正確さであるが、ピアノや他人の高さ(調)に合わせて歌うのが困難で、そういう場合は著しく音程が悪くなり、調子外れとなる。
D	声域、音程が狭く、ピッチを上下させて歌ってはいるものの、歌詞がなければ何を歌っているのか分からない。
E	話しているような一本調子の歌い方で、音程がはっきりしない。(ピッチのイメージがない)

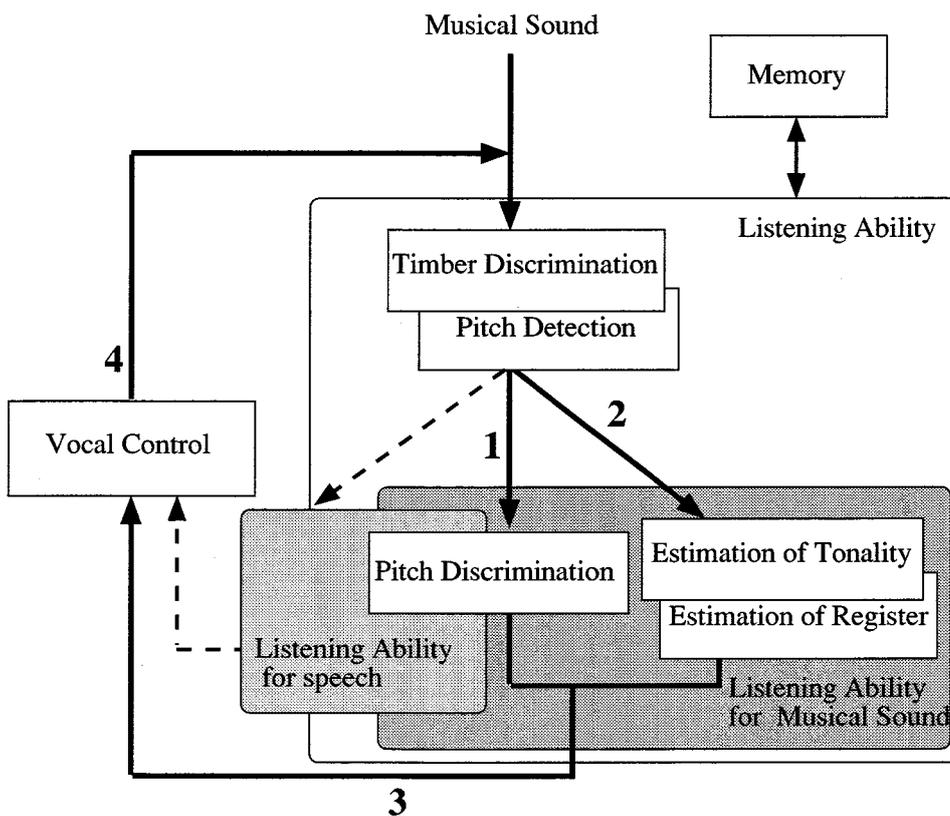


図 3.1 ピッチマッチの制御モデル

聴覚の基本的な機能として音色判断・ピッチ検出機能の他、目的音とのピッチの差を判断するピッチ弁別機能、目的音と自分の声域との判断を行う声域判断機能、音楽的能力である調性判断機能がピッチマッチに関与すると言える。この図で、1の経路は得られたピッチと目標ピッチとの差異を弁別するための経路、2の経路は得られたピッチが調性、声域内の音かどうかを判断する経路、3は得られた判断結果から発声系へフィードバックする経路、4は自分で発声された音声を知覚する経路である。各機能は記憶と連動して動作し、出力情報が発声器官を制御し、歌声を発声すると考えられる。音痴の人でも特定の曲は問題なく歌える場合に対しては、破線で表す経路により言語能力の助けを借りて歌っていると考えられる。

次に、このモデルを村尾らが分類した音痴のクラス（Aを除く）と対応させ、治療に必要な訓練について考察する。

#### 【クラス B】

音楽音響的能力はあるが発声制御が不安定であることから、ルート3の発声器官制御に主な問題があると考えられる。そのため、楽器等を用いて不得意な音階や音程の発声訓練を行い、発声の正確さを訓練すればよい。自分を音痴と思っている人の多くはこのクラスと言われている。稀にルート4に問題のある人もおり、自身の発声音が他の音と区別できないことがある。その場合は耳に手をあてて、骨伝導による補助を強めて自分の発声音を聴き取るということが行われる。

#### 【クラス C】

自分一人では旋律をほぼ正確に歌えるため、発声器官の制御には問題はないと言える。しかし他の調で歌う場合や、他の音に合わせて歌う場合に音痴となることから、主に感覚性であるルート1,2に問題があると考えられる。治療としては他の調や発声できない音域に対する感覚を養えばよいと考えられ、それらの音を意識的にピッチマッチができるよう訓練を行うことが必要となる。また、ピッチマッチを行う音色にも左右されるため、人間の声やそれに近い音から訓練を始め、他の音色に拡張して行けばよいとされる。

#### 【クラス D】

主に歌う経験の少なさに起因しており、発声可能な音域や変化させられる音程が狭いものの、それらの中ではピッチマッチ可能なことから、主にルート1,3が音痴の要因だと考えられる。発声可能な音域から少し外れた音階でピッチマッチの訓練を行い、徐々に声域を拡張する訓練が必要となる。また、歌える音程よりも広い音程を連続的にピッチマッチを行う訓練が有効とされる。

#### 【クラス E】

楽音に対するピッチの聴覚イメージがないことから、図3.1の音楽音響的能力自体が形成されていないと考えられる。また、意識してピッチの制御を行えないため、運動性の障害も持っていると言える。そのため、ルート1,2,3に問題があると考えられる。

まずはピッチの高低感覚の獲得が必要となる。そのため、訓練では始めからピッチマッチを行わず、ピッチが連続的に変化する様子を視覚提示し、それに追従して発声させる訓練を行う。具体的にはカウンセラーが自分で発声しながら指先などでピッチの変化を上下に表し、同様の発声をさせる等、ピッチのイメージを聴覚・視覚の両方から習得させるという手法が使われる。ピッチの感覚が形成された後、ピッチマッチの訓練を行う。この研究では、クラス B~E に属する人を対象にしており、意識的にピッチの弁別が可能で、歌としてピッチを外さず歌える程度を治療目標とし、その治療支援を有効に行えるシステムを目指す。また、ユーザとしては音痴の恥ずかしさという心理的な要因が音痴治療の妨げになることもありえるため、自宅で一人でも訓練が行え、容易に扱えるシステムとすることも開発の要件として挙げる。歌唱能力向上のための訓練に対しては現段階ではシステム要件としていない。

### 3.3 音痴治療支援システムに必要な機能について

音痴治療支援システムとして必要な機能をまとめる。まず発声音のピッチをリアルタイムで検出する機能が必要である。SINGAD によってピッチマッチ訓練に視覚フィードバックが有効であることが示されているため、ピッチの視覚提示も基本的な機能とする。

次に、ピッチマッチさせる目標音の音響出力機能やそのピッチ情報の表示機能も基本機能とする。ピッチマッチに用いる音色の違いについては Yarbrough らの研究 [Yarbrough 1992] で述べられており、音痴の人は人間の声やそれに近いフルート等の音色がピッチマッチし易く、減衰系の音色ほどピッチマッチし難くなる等の結果が出ている。そこで本システムではユーザがピッチマッチし易い音色を自由に選べるよう、様々な音色を選択できる機能も実装する。

また、訓練課題の単音のピッチや音程変化、メロディ等はユーザやカウンセラーが自由に設定できることが望ましい。訓練結果を後から閲覧、解析できるよう記録されることも必要であることから、これらも開発に必要な要件とする。加えて、自宅で一人で訓練することなども考慮して、楽しみながら訓練ができるよう、ゲーム性をもたせた訓練課題の提示が行えるシステムとして実装することとした。

## 3.4 システムの実装

### 3.4.1 システム概要

このシステムには図 3.2 の概略図の通り特別なハードウェアを必要とせず、手軽に扱えるよう Macintosh (PowerPC プロセッサ搭載) 1 台で動作するシステムである。ソフトウェアは MacOS 上の Max [片寄 1998] で実装され、スタンドアロンアプリケーション

ンとして動作する。Max は実行環境を兼ねたビジュアルプログラミング環境であり，初心者でも手軽にマルチメディア処理が扱えるミドルウェアとして，インタラクティブなマルチメディアコンテンツやアート作品等で多く利用されている。本システムも Max のマルチメディア制御機能を生かして構築されている。また，本システムの以前の構成 [片寄 1995][片寄 1997] ではピッチ抽出を専用ハードウェアで行っていたが，計算機能力の向上と共にソフトウェアによる処理も行えるようにした。ピッチマッチに用いる目標音はソフトウェアシンセサイザの機能を用いることで MIDI 音源のハードウェアは特に必要とせず，すべてソフトウェアで実現している。システムの実行内容は，楽しみながら訓練できるようにゲーム的要素やカラオケ的要素も含んだものとなっている。以下，VSG に実装された各機能と内容について述べる。

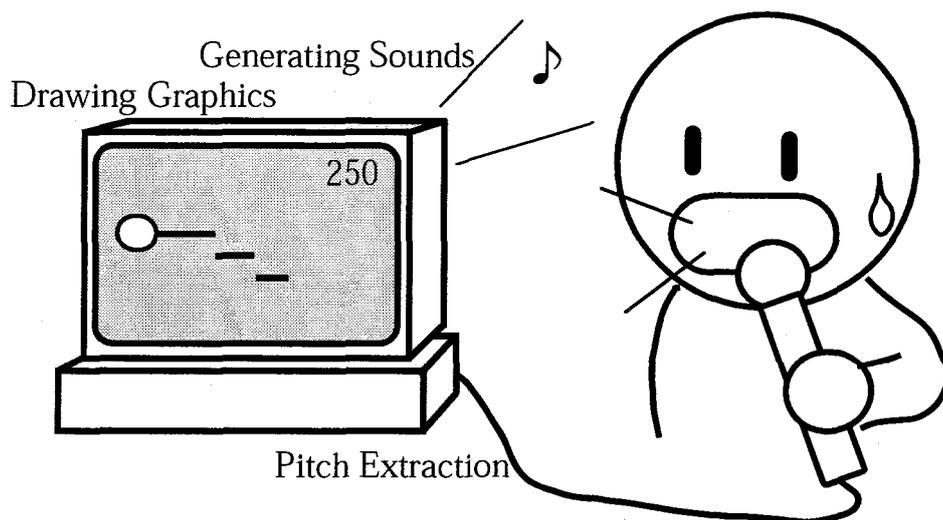


図 3.2 VSG の概略図

### 3.4.2 各種機能

#### 【ピッチセンサ】

このシステムではリアルタイムで入力音声のピッチ抽出が必要となる。ピッチ抽出手法に関しては様々な手法が提案 [Noll 1967][國枝 1997][都木 1997] されているが，歌声を処理するには普通の会話音声より高いピッチのリアルタイム抽出を安定して行う必要がある。本システムでは，幾つかの予備実験の結果，比較的安定して処理できたケプストラム法を用いることにした。22kHz, 16bit でサンプリングされた音響信号に対して 512 点のハミング窓を用いて処理し，抽出可能な周波数帯域は約 100~800Hz としている。窓のステップサイズは 512 点としたため，抽出の時間分解能は約 23msec である。この処理を Max 上で動作させるための，Max オブジェクト（プラグイン）を実装した [平井 1998]。このオブジェクトは音響信号の入力に対しピッチとパワーを出力する。Max 上でのサンプルパッチを図 3.3 に示す。

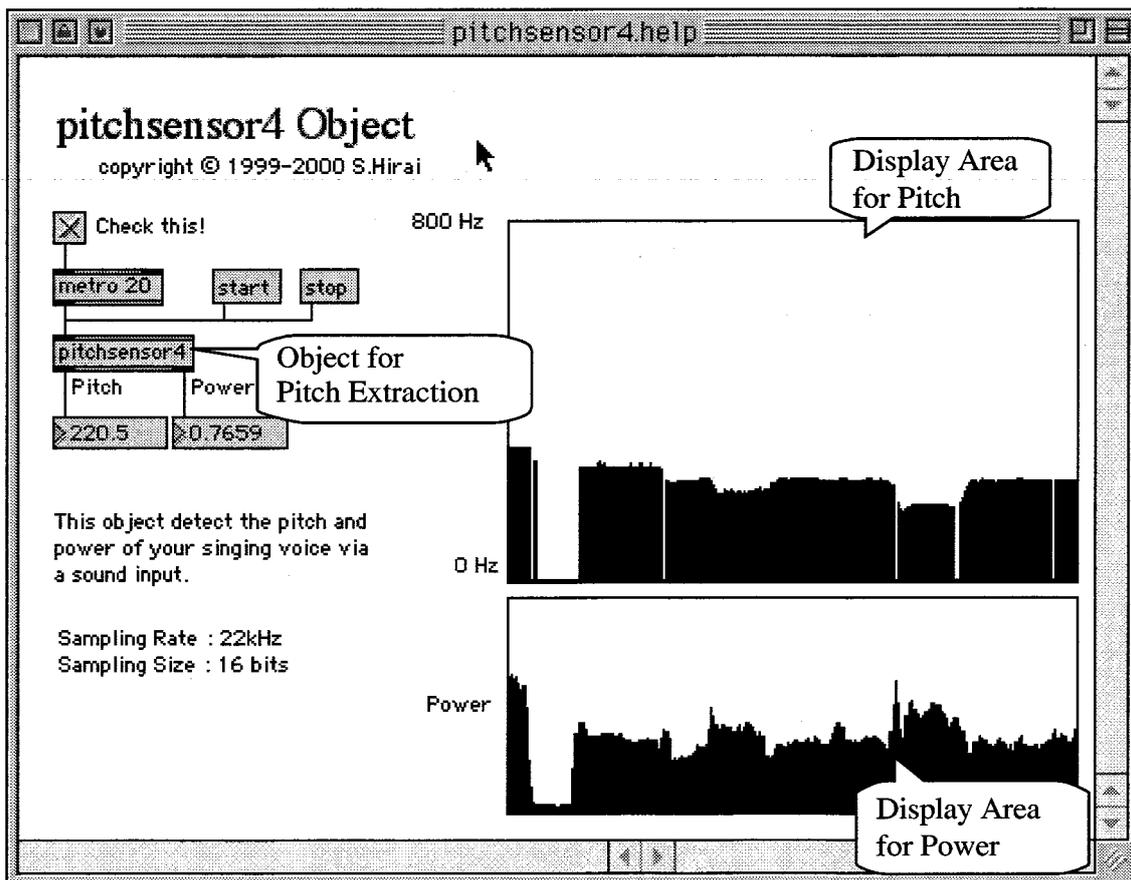


図 3.3 ソフトウェアピッチ抽出センサの Max サンプルパッチ

ここで、実装したソフトウェアピッチ抽出センサについて、性能評価を行った。音痴でない成人男女合計 11 人（男性 8 人，女性 3 人）にハ長調の各音階を 5 母音とハミングで各々数秒発声してもらい（データ総数 1020 個），ピッチの抽出率を表 3.2 にまとめた。但しこの評価においては，予備実験で被験者毎に安定して発声可能な声域を調べておき，その声域内で評価実験の目標ピッチのみ発声を行ってもらった。また発声したピッチが目標ピッチの 50cent 以内で抽出できていれば正解とし，各目標ピッチ毎に正解率をピッチ抽出率とした。この結果では，100Hz 付近の G1(98Hz) の音階では抽出率が低くなっており，800Hz 付近の G4(784Hz) 近くも多少下がっている。誤抽出は特定個人で起こっており，個人の声質が原因と考えられる。しかし，一般的に歌を歌う場合に用いられる C2-C4 間の音階ではほぼ 100%であるため，本システムの機能としては問題ないと言える。

表 3.2 ソフトウェアピッチ抽出センサの音階毎抽出率（ハ長調）

	F1	G1	A1	B1	C2	D2	E2	F2	G2	A2	B2	C3	D3	E3	F3	G3	A3	B3	C4	D4	E4	F4	G4
a	0/1	6/7	7/7	1/7	1/8	8/8	9/9	10/10	10/10	11/11	11/11	11/11	11/11	10/10	9/9	6/6	3/6	3/6	3/6	2/5	3/5	3/3	3/3
i	0/1	1/7	7/7	7/7	8/8	8/8	9/9	10/10	10/10	11/11	11/11	11/11	11/11	10/10	9/9	6/6	6/6	6/6	6/6	3/5	3/5	3/3	3/3
u	0/1	3/7	1/7	7/7	8/8	8/8	9/9	10/10	10/10	11/11	11/11	11/11	11/11	9/10	9/9	6/6	6/6	6/6	3/6	3/5	4/5	2/3	2/3
e	0/1	3/7	2/7	7/7	8/8	8/8	9/9	10/10	10/10	11/11	11/11	11/11	11/11	9/10	8/9	6/6	6/6	6/6	3/6	4/5	4/5	2/3	2/3
o	0/1	2/7	2/7	7/7	8/8	8/8	9/9	10/10	10/10	11/11	11/11	11/11	11/11	9/10	9/9	6/6	6/6	6/6	6/6	3/5	2/5	2/3	1/3
hum	0/1	5/7	2/7	1/7	1/8	1/8	9/9	10/10	10/10	11/11	11/11	11/11	11/11	10/10	9/9	6/6	6/6	6/6	6/6	4/5	3/5	2/3	3/3
Extraction Rate (%)	0	54.8	83.3	95.2	95.8	97.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	95.0	98.2	100.0	97.2	97.2	91.7	70.0	70.0	77.8	77.8

### 【目標音の音色選択・発音制御】

ピッチマッチを行う目標音の音響提示は QuickTime のソフトウェアシンセサイザを用いて実現した。様々な音色を鳴らせるため、ピッチマッチし易いとされる人間の歌声やフルート、サクソ等音色や、その他様々な音色を自由に選択可能である。ユーザによって好みや合わせ易い音色があるため、メニューによって簡単に音色を選択できるようにした。また、発音は MIDI 制御であるため、後述の訓練データの移調や発音タイミング、音量の変更は容易に制御できる。

### 【訓練データの作成】

音痴の人それぞれに声域が違うため、特定の音程差の発声訓練が行えるよう、自由に訓練データを設定できることが望ましい。本システムでは訓練データをテキストファイルとして作成する。このテキストデータは、音高と音長の情報を一音ずつ記述する形式であり、任意の訓練データが作成可能である。また、スタンダード MIDI ファイルからメロディを訓練用テキストファイルに変換するコンバータも用意しており、任意の曲のデータの作成も容易となっている。データがユーザの声域に合わない場合は、設定画面でデータの移調が行える。

## 3.4.3 各動作モードの説明

VSG では訓練目的に合わせた 3 種類のモードが用意されている。それぞれのモードについて説明する。

### 【軌跡描画モード】

図 3.4 に示す軌跡描画モードは基本的な機能のみのモードであり、歌声のピッチ、パワーを表示する。ピッチの表示領域では画面の上下方向がピッチの高低を表しており、クラス E の人がこの機能を利用してピッチの高低感覚を養う訓練を行う。表示するピッチの範囲は任意に指定できるようになっており、ユーザの声域に合った表示が可能であ

る。パワーは音声が入力されているか確認できるように表示している。また、このモードでは入力音声のピッチとパワーを画面表示する機能に限定しているため、ユーザに単調さを感じさせないように、ユーザの発声ピッチに応じて、ピッチ・パワーの表示色を変化させながら描画する。

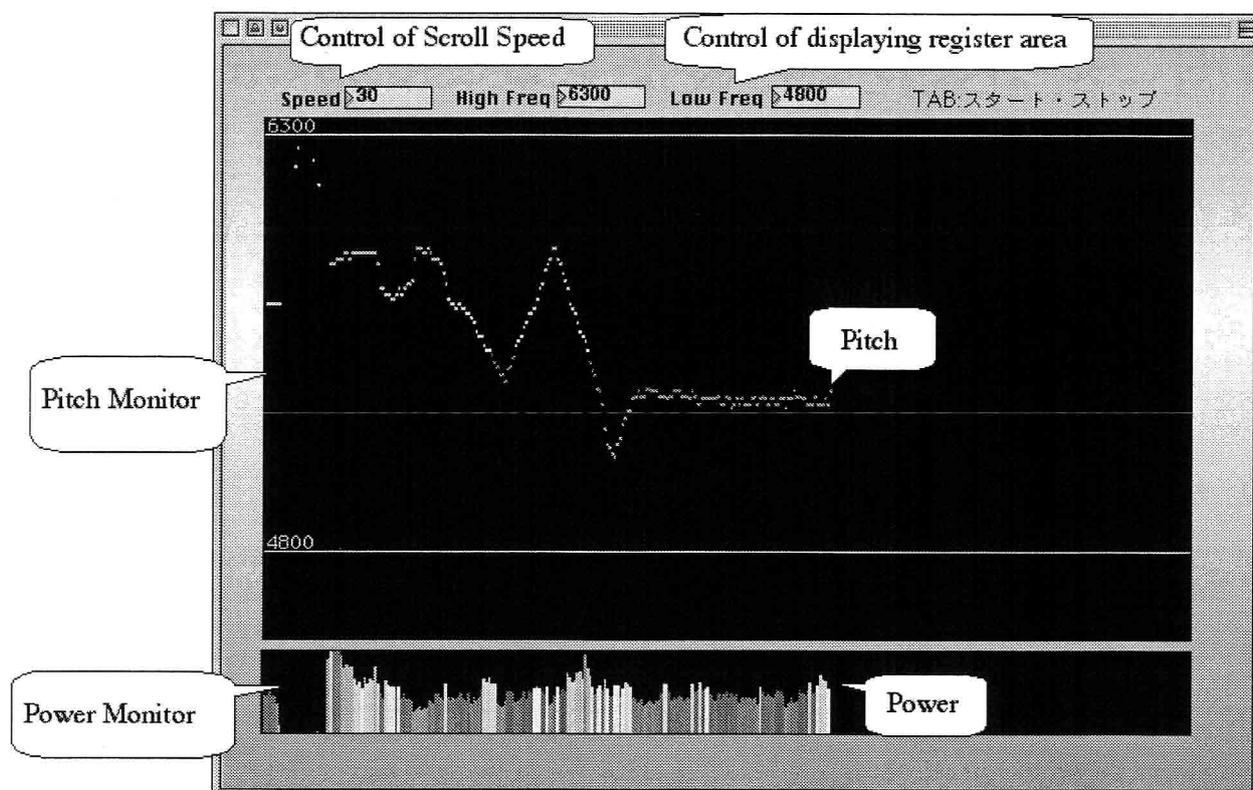


図 3.4 軌跡描画モードの画面例

### 【ゲームモード】

ゲームモードの画面を図3.5に示す。ここでは、左端に表示されるキャラクタ（ブタ）を、ユーザが発声するピッチで上下にコントロールする。システムが音響的に提示する目標音と共にそのピッチに対応した高さで右端から左へ飛んでくるターゲット（肉）に対し、同じピッチを発声することでターゲットをキャッチする（肉を食べる）ゲームであり、このキャッチする行為でピッチマッチ訓練を行う。キャッチすると得点が加算され、できなかった場合減点される。このモードでは作成した訓練データの利用が可能だが、音長情報は無視されて音階のデータのみが訓練に用いられる。ターゲットをキャッチした時点で訓練データの次の音階データを元にした目標音が提示される。設定画面用ボタンを押して表れる設定画面により、訓練データの移調や、ゲームスピード、ピッチマッチの判定範囲の他、障害物（右からゆっくりと流れてくる雲）の設定が行える等、ゲームとしての難易度が変更できる。また、ターゲットの画面表示をオフにすることで

音響提示のみとしても動作し，視覚フィードバックでピッチマッチできるようになった人が，聴覚のみのピッチマッチの訓練に利用することもできる．訓練結果は，各音に対するキャッチし損ねた回数が記録され，訓練後の解析によりピッチマッチできる速度や苦手なピッチの診断が行われる．このモードは基本的なピッチマッチの訓練として，すべてのクラスの治療で用いることができる．クラスCでは目標音の音色の違いを設定し，クラスDでは声域を広げるような訓練データを作成し，ピッチマッチ訓練が行われる．

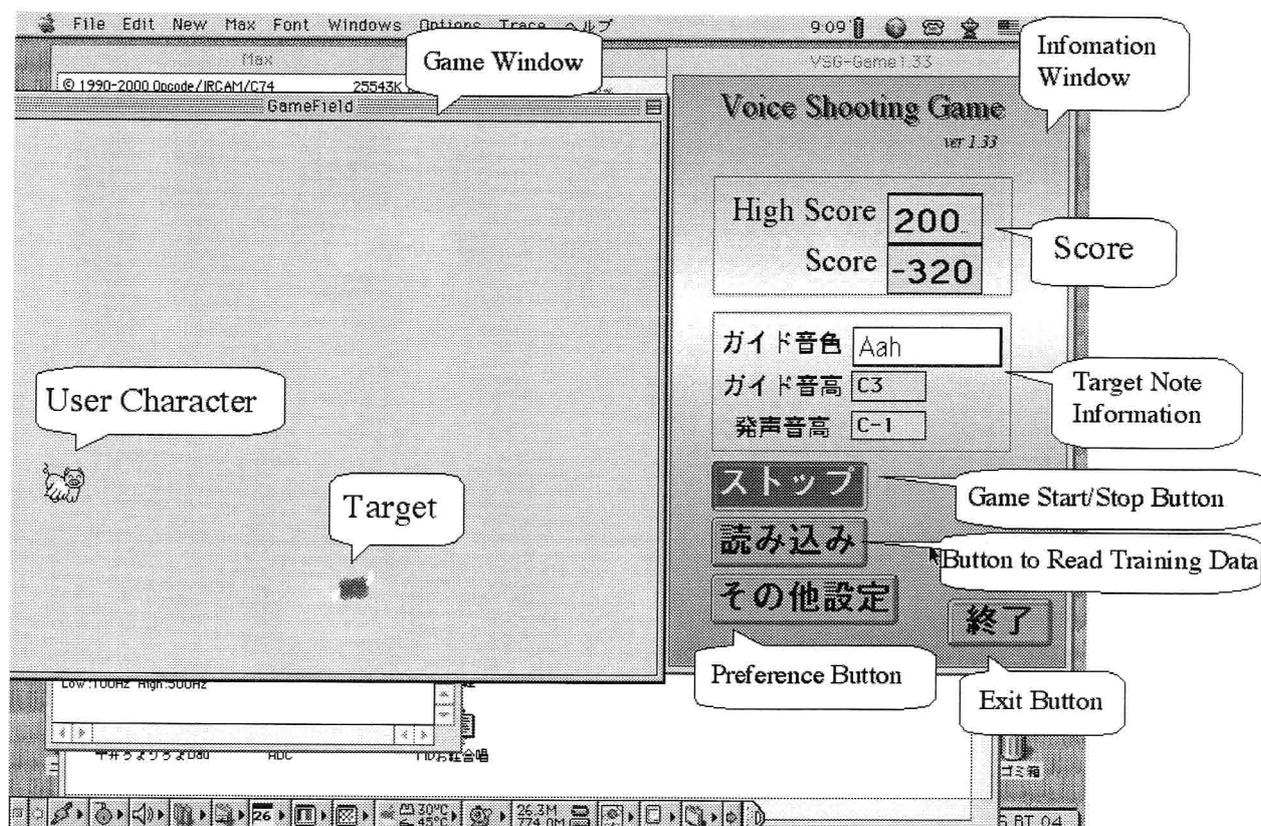


図 3.5 ゲームモードの画面例

### 【トレースモード】

図 3.6 に示すトレースモードでは，訓練データの時系列ピッチ変化を画面上で横方向に表示される．ユーザは発声したピッチで表示される軌跡で訓練データに対し「なぞり」を行うことでピッチの訓練を行う．青色で表示される訓練データの進行に合わせた目標音が提示され，ユーザはそれに合わせて歌う．入力された音声のピッチは白色で表示され，目標ピッチとの差異がリアルタイムに確認できる．画面表示は，表示領域の左端を基点に右方向へ時間が進み，右端に来ると画面が切り替わるようになっている．設定画面では訓練データの移調やスピードの設定が可能である．

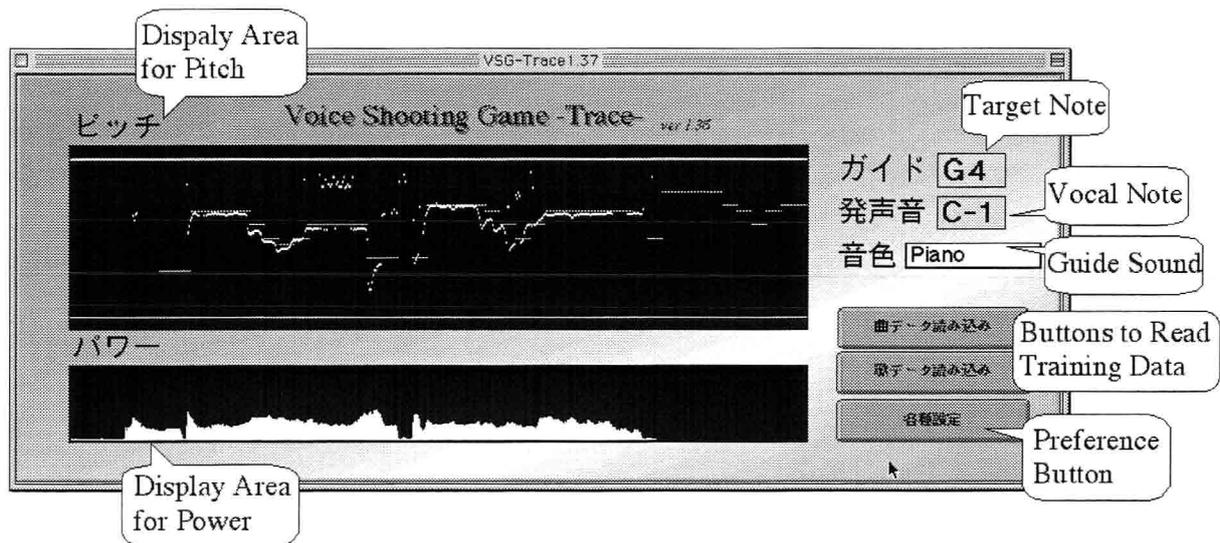


図 3.6 トレースモードの画面例

このモードは、ユーザがゲームモードで一音ずつ独立したピッチマッチが行えるようになった後、連続した音階変化に対して時系列的なピッチマッチ訓練を行うためのモードである。発声ピッチとその時刻における目標音のピッチの情報が訓練結果として記録される。マッチング度のような結果を自動で計算しないが、記録されたデータは後で VSG-Viewer(図 3.7 参照)で確認可能であり、カウンセラーは苦手なピッチや音程、ピッチマッチできる速度等の診断に利用できる。また、この記録されたデータはトレースモードで訓練データとして再利用することができる。この機能により、他の人が歌ったピッチ変化をなぞる練習ができる。

## 3.5 VSG を用いた訓練手順と治療例

VSG の利用について、本節ではクラス B~E の各クラス毎に訓練手順とカウンセラーによる実際の治療例を述べる。

### 3.5.1 クラス B の例

治療例として 20 代の音楽教育専攻の学生を挙げる。検査の結果、ピッチ弁別や調性の判断は全く問題ないが、ピッチマッチに必要な時間が多少長いという症状であり、特定の音階や音程で問題があることもなかった。これは図 3.1 でのルート 3 の問題と判断できる。そこで、ゲームモードでピッチマッチ訓練をした後、トレースモードで訓練するというクラス B 用の手順を行った。ゲームモードで訓練を行った所、最初は同じ音で 5, 6 回繰り返さないとピッチマッチができず低得点であったが、3 週間程度の訓練の結果、即座にピッチマッチできるようになり、トレースモードにおいても問題なくなぞりができ、音痴が改善されることが確認された。

### 3.5.2 クラスCの例

クラスCの例として、元々発声は良かった30代後半の女性を挙げる。「津軽海峡冬景色」を一人で歌った場合は問題なく歌えたが、トレースモードで歌うと図3.7(a)のように「わたしは」や「れんらく」の部分で上方へ100cent以上外れる状態であった。伴奏や音域によって音痴となるため、図3.1のルート1,2が問題だと言える。ゲームモードで他の調や音色を用いてしばらく訓練を行い、単音のピッチマッチはほぼ正確にできるようになった。次にトレースモードで「津軽海峡冬景色」の旋律をなぞる練習を2,3度行くと、視覚フィードバックの効果があり、図3.7(b)のように50cent以下のずれで正確になぞって歌えるようになった。

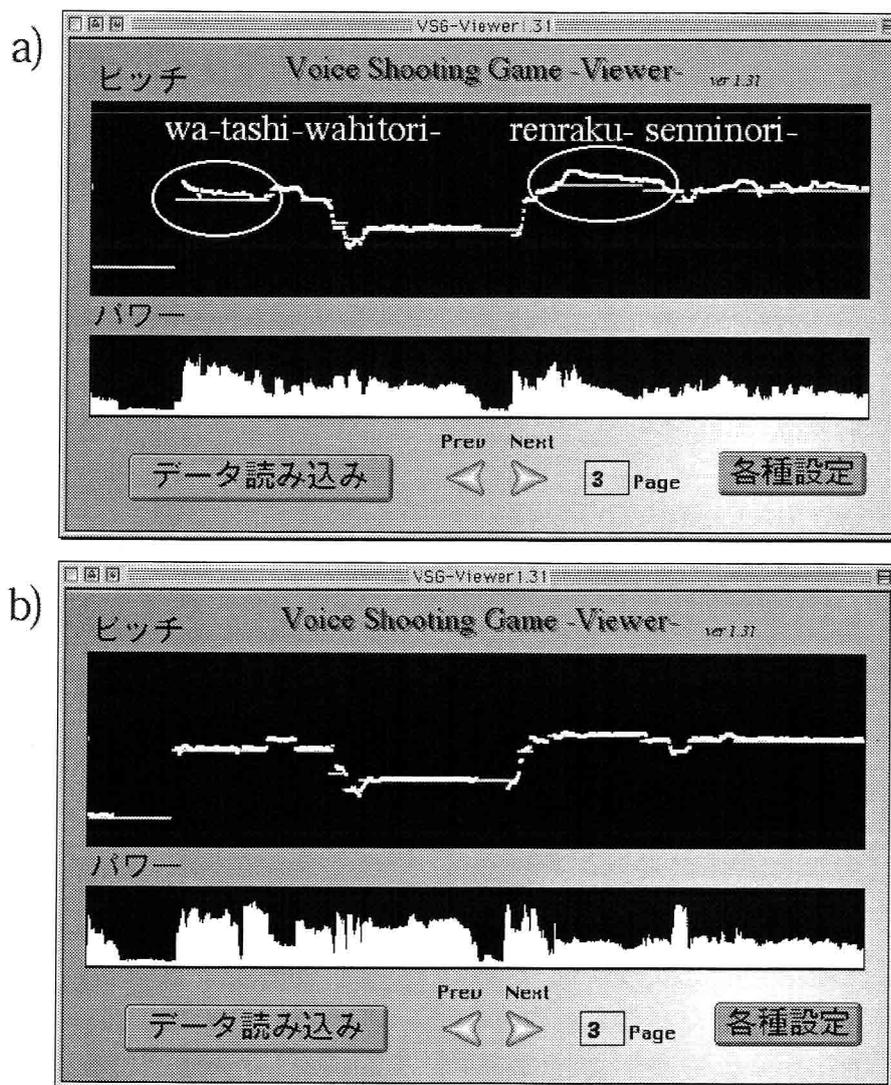


図 3.7 「津軽海峡冬景色」による訓練結果 (サビ前)

a) 訓練前 b) 訓練後

### 3.5.3 クラスDの例

幼少時、歌を教師に笑われてから歌わなくなった40代前半の女性の例を挙げる。歌う経験の少なさのため意識して出せる声域が1オクターブもなく、うまく発声制御ができない状態であった。歌唱曲の「ちょうちょう」は、音痴の人が「なのはにとまれ」の部分を正確に歌えないという多くの事例[村尾1995]がある。そこで、この女性に「ちょうちょう」を歌ってもらった結果、「とまれ」の部分で図3.8(a)のように上方に200cent程度外れていた。ゲームモードでしばらくピッチマッチ訓練を行い、声域が1オクターブ半に広がると共にピッチマッチができるようになった。その後、3回のトレーサモードの試行により、図3.8(b)のように80cent以内の音程で歌えるようになり、音痴の改善が確認できた。

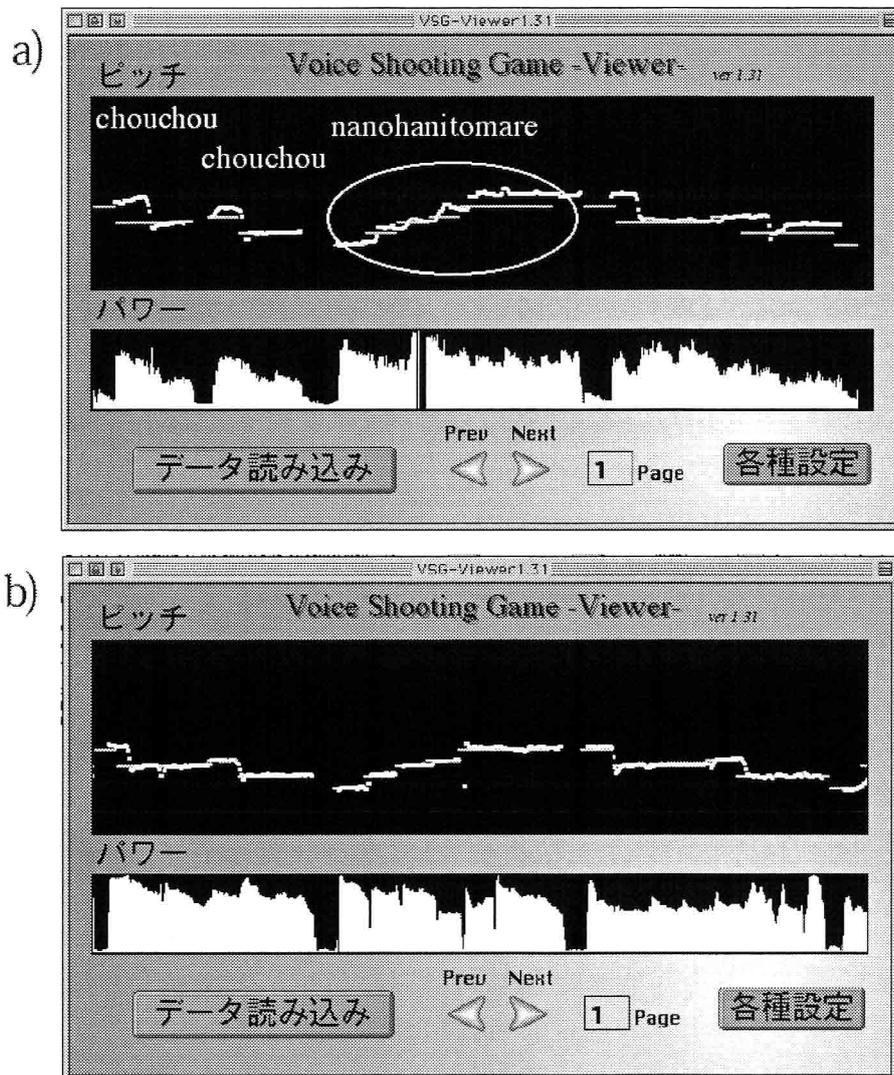


図 3.8 「ちょうちょう」による訓練結果（冒頭部）  
a) 訓練前 b) 訓練後

### 3.5.4 クラス E の例

ピッチの高低の概念がなかった 30 代後半の男性の例を挙げる。まずゲームモードで「ちょうちょう」のピッチマッチを行ったところ表 3.3 の結果が得られた。

表 3.3 治療前のゲームモード結果 (クラス E)

word	note	miss	word	note	miss
cho	G3	5	na	C3	0
u	E3	16	no	D3	15
cho	E3	25	ha	E3	0
cho	F3	0	ni	F3	3
u	D3	2	to	G3	8
cho	D3	4	ma	G3	17
			re	G3	1

すぐにピッチマッチできた部分もあるが、適当に声を出しているような様子であり、失敗回数のばらつきも多い。そこでピッチの感覚を獲得するため、軌跡描画モードでの訓練を行った。低いピッチから高いピッチへの連続的な発声（画面では左下から右上への線となる）は数回の試行で可能となった。また、この男性の場合、高いピッチから低いピッチへの発声が苦手であったが、30 分程度の練習を経て大きく改善された。数時間後にピッチによって画面上に山や谷を描くことも、それらのなぞりも可能となった。次に、一日に 10 分程度の訓練をゲームモードを使って自宅で 2 週間続けた。その結果、表 3.4 に示すようにばらつきがなく数回でピッチマッチできる状況にまで改善された。また、視覚フィードバックがなくともピッチマッチが可能となった。この例では、まだ歌として旋律を十分に歌えるまでには至っていないが、短期間でピッチの感覚が獲得できたこと、ピッチマッチの能力が身についたことが確認された。

表 3.4 治療後のゲームモード結果 (クラス E)

word	note	miss	word	note	miss
cho	G3	2	na	C3	2
u	E3	1	no	D3	1
cho	E3	0	ha	E3	0
cho	F3	3	ni	F3	2
u	D3	2	to	G3	4
cho	D3	0	ma	G3	1
			re	G3	0

### 3.4.5 治療例まとめ

前節までに示した通り VSG を用いて音痴訓練を行った結果、音痴が治療もしくは改善されていることが確認された。これまで、実際に VSG によって訓練を行った人数は 10 人以上であり、カウンセラーの所へ来る音痴の人のほとんどはこのシステムによる訓練で改善可能な症状であることもわかっている。従来のカウンセリングでは、週に 1 回あるいは月に数回というペースで訓練を行ったとして、成果が上がるまでには数ヶ月から半年はかかると言われている。これに対し、VSG を場合は自宅で一人で訓練できるため、数十分～1ヶ月程度で改善された結果が得られた。また、視覚フィードバックとピッチマッチ訓練に関して、その期間的な影響についてはほとんど議論がなされてこなかった。VSG を用いたクラス E の治療事例からは、ピッチの感覚の獲得に関しても視覚フィードバックが有効であるというような状況を読み取ることができる。

VSG ユーザの主観報告からは、自宅で利用できるため訓練に対する恥ずかしさがないという報告や、ゲームの楽しさから繰り返して訓練を行うことなど、心理的な側面でも有効と判断できる報告が得られた。カウンセラーからは、各人毎に必要な訓練課題が容易に作成できる点が、治療支援に有効という評価も得ている。これらの治療例とユーザの主観報告をまとめると、VSG が音痴治療支援として有効であることが示され、またピッチの感覚獲得に関する新たな効果が示唆された。一方で、PC の扱いに慣れていないユーザからはシステムの扱いが難しいという報告もあり、ユーザインタフェースの改良は必要である。また、トレースモードについては現在はカウンセラーが結果を見て診断する利用形態であるため、ユーザ自身ではどの部分がどのように悪いのか判断し難い

面もあり、今後、トレースモードの自動診断機能やユーザへの診断結果提示機能を持たせる必要もあると考える。

### 3.6 第3章まとめ

本章では、音痴の治療支援システム VSG について述べた。まずは音痴の症状とその要因に対し、機能モデルの観点から考察を行った。そして治療で行う訓練方法に必要な機能を整理し、それらの実装について説明した。次に、実際に音痴治療の現場で活用された事例を述べ、その訓練結果や治療期間、ユーザの主観評価から本システムの有効性を示した。また、ピッチの感覚がないクラス E の音痴については、ピッチマッチ訓練以前の、ピッチの高低感覚の獲得に関する新たな有効性が示唆された。

現在の VSG の機能では、訓練結果を蓄積することでユーザの治療進行度合いが判断できるが、症状そのものや必要な訓練についてはカウンセラーが初期診断を行う必要がある。今後は音痴の症状を自動診断し、最適な訓練課題を提示できるシステムへ発展させることが必要である。また、現在は母音を中心とした訓練を対象としているため、ピッチ抽出としてケプストラム法で安定した処理を行えているが、短い音符が連続するような訓練を行うには子音も考慮する必要がある。ピッチ抽出法として問題が残っている。この問題の解決法としては、河原らの論文 [河原 1997] で提案されている、ピッチ・音量の安定性を考慮した周波数分析手法の導入を予定している。

一方、音痴治療手法については、ピッチの高低感覚獲得に関して視覚フィードバックの有効性を定量的に評価することが今後の課題である。また、最近では動物の鳴き声等をまねることでピッチ変化に対する感覚を養う、弓場の治療手法 [弓場 1998] が注目されているが、これについては鳴き声等のピッチ変化の訓練を VSG のトレースモードを用いて同等の訓練が可能と考えられ、この手法でも VSG が有効に利用できる可能性がある。

更に、ピッチが西洋音階で表せないもの、例えば仏教の声明や邦楽等について効率的な訓練への応用についても可能性があり、今後取り組むべき課題である。

## 第4章 新世代楽器による

### インタラクティブアート創作システム

本章では、インタラクティブアート創作システムの研究について述べる。その具体事例として、インタラクティブアートプロジェクト：「竹管の宇宙」を採り上げる。このプロジェクトはプロの尺八奏者との共同研究という形態で実施され、新しい音楽表現を行うというニーズのもとで行われた。そして実際に尺八奏者とコンピュータ間でインタラクティブを行うコンピュータ音楽作品を制作し、コンサート活動を行っている。ここでは、尺八演奏技法のジェスチャをセンシングできる新世代楽器「Cyber 尺八」の開発や、インタラクティブアート制作・実行を効率よく行うためのソフトウェアツールキット「HIAT」が開発された。本章では、まず開発したそれら技術について解説を行い、そして、それらの技術を利用した作品制作の手法と作品内容の紹介を行う。また、本章の後半では、このプロジェクトで行った、コンサート演奏における演奏者の生理指標計測実験について述べる。この実験は、プロの演奏者の演奏中（インタラクティブ中）の緊張感に注目し、その生理的緊張状態を計測したものである。ここではプロの演奏者の練習やリハーサル、コンサート本番と違う場面での演奏中の緊張状態の違いが示された。また、曲が持つ緊張感と演奏中の緊張状態の違いの結果も得られている。そして、生理的緊張感に関してプロの演奏家としての指針という観点で考察を行う。

## 4.1 はじめに

計算機で楽音を合成することを基本としたコンピュータ音楽は、多大な計算の必要性からテープ作品を制作し、それを聞くというスタイルが採られてきた。最近では、計算機能力の向上と共にリアルタイムで楽音生成する形に移行しつつある。さらに、センシング技術を利用するインタラクション技術を組み合わせることで、今までにはなしえなかった表現を模索するインタラクティブコンピュータ音楽として発展を続けている [Chadabe 1983][安西 2000]。

この研究でも、新しいインタラクティブコンピュータ音楽の制作を目的とし、インタラクティブアート創作システムの研究開発と作品制作を続けてきた。本章では、そのインタラクティブアートプロジェクト：「竹管の宇宙」を採り上げるものとする。ここでは、技術開発がベースとなっており、その一つが演奏ジェスチャをシステムに入力できる新世代楽器"Cyber 尺八"である。また、ビジュアルプログラミング環境 Max を利用した効率的なコンテンツ制作ツールキット"HIAT"の開発も行った。作品制作に関しては、HIAT を利用したコンテンツ制作モデルの設定を行い、実際に制作を行ってきた。また、制作した作品の公演も世界各地で行っている。本章の前半では、これらインタラクティブアート創作システムの研究開発成果について述べ、作品内容の解説を行う。

また、この研究事例では、将来的な生理的インタフェースの導入を考えて、演奏中の演奏者の生理指標計測も行ってきた。この実験に際しては、生理指標計測装置の開発も行い、実際のコンサートでも計測を行える環境を整えた。そして、生理指標の中でも、緊張感に関係する自律神経系生理指標をターゲットに、計測実験を行ってきた。ここではプロの演奏者に関する幾つかの興味深い知見が得られている。本章の後半では、この実験環境と実験結果について述べる。

以下 4.2 節では、インタラクティブコンピュータ音楽の制作環境として楽器"Cyber 尺八"と作品制作のためのフレームワーク"HIAT"について述べ、4.3 節で「竹管の宇宙」の作品コンセプトやシステム構成、演奏内容の解説を行う。本章後半である 4.4 節では作品・公演の検討を行うための生理指標計測について説明した後、4.5 節で演奏時の演奏者の生理的緊張状態や内観に基づく考察を行う。4.6 節では「竹管の宇宙」プロジェクトにおける研究のまとめとして、4.5 節の考察も踏まえてプロジェクトの今後について述べる。

## 4.2 作品制作環境

インタラクティブコンピュータ音楽を含むインタラクティブアートは、情報処理技術、特に、メディア情報処理技術とインタラクション技術を応用した芸術領域である。一般に、インタラクティブアートは芸術としての制作とその技術的な実装が独自作業として実施される場合が多く、他のマルチメディアコンテンツに比べ必ずしも生産性が意識さ

れてきた領域とは言えない。制作者側の立場からは、簡易なジェスチャセンサや表現の幅を広げるツールや環境に対する大きなニーズが存在している [Katayose 1997]。本節では、生産性や応用性を考慮して我々が開発してきた制作環境について述べる。まずハードウェアとして、汎用ジェスチャセンシングユニット ATOM8 について説明し、その応用として開発したCyber 尺八 [金森 1997] について説明する。次にソフトウェアとして、Max ベースのインタラクティブアート用フレームワーク HIAT について述べ、それを用いたコンテンツ制作モデルについて紹介する。

#### 4.2.1 ハードウェア環境

##### 【汎用デジタイザ ATOM8】

演奏者の負担を考えると、ジェスチャを取得するセンシングユニットはできるだけ小型のものが望ましい。また、演奏場所や場面によってはテレメータ機能（無線システムによるセンシング）もあることが望ましい。図 4.1. に示す ATOM8 (Analog TO Midi converter 8ch version) はそのような観点から、開発を行った汎用センサユニットである。これは Microchip 社のマイクロプロセッサ PIC の制御のもと、8ch までのトランスデューサ入力信号を A/D 変換可能を行う。デジタル化された信号は、RS232C あるいは MIDI 信号として送信される。目的に応じて無線送信用のユニットを付加することも可能である。計測データの時間分解能は 10ms のオーダーで設定することができる。

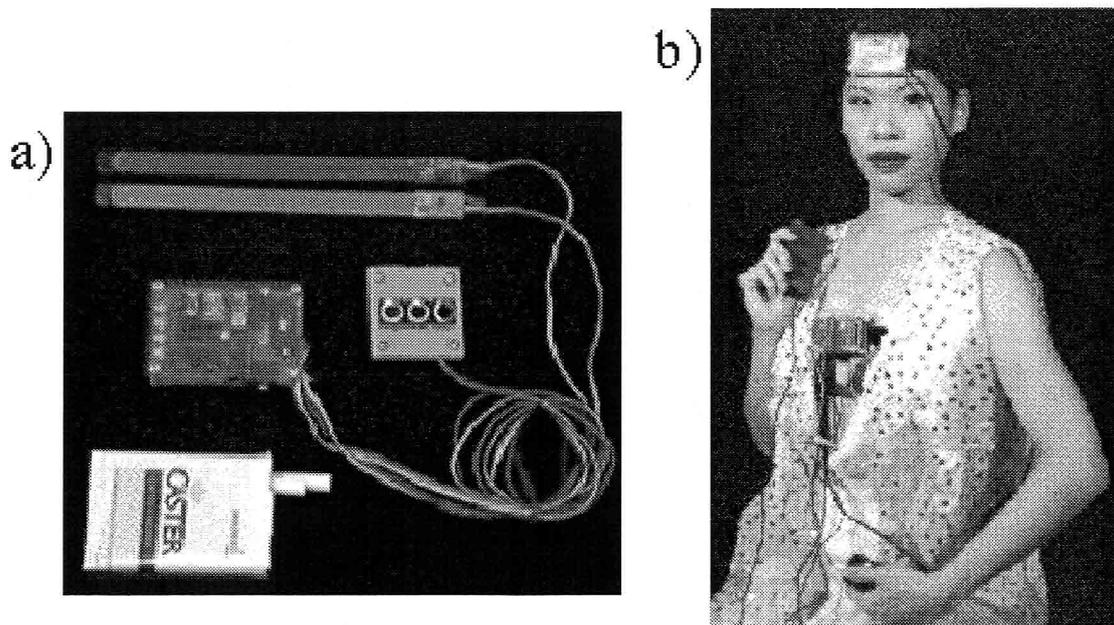


図 4.1 ATOM8 の概観

a) ATOM8 ユニット, b) 頭部と胸部への装着例

## 【新世代楽器 Cyber 尺八】

主に規格化によって発展してきた西洋楽器に対し，尺八を含む日本の伝統楽器は竹管などの楽器素材の多様性を生かした自然の形態を利用したものが多い．その中でも尺八は単なる指遣いと吹奏だけではない身体表現全体が独特で重要な楽器として位置付けられている．これらの考えにもとづき，既存の尺八の機能を損なうことなく，演奏表現に関わる身体表現のセンシングを行うことを本研究での新世代楽器のコンセプトとした．Cyber 尺八は，そのコンセプトのもと，従来の尺八に手を加えるという形で製作した新世代楽器である．ここではATOM8がセンシングユニットとして利用されており，指遣いや首振りなどの演奏ジェスチャを計測可能となっている（図 4.2～4.4 参照）．

Cyber 尺八は，1) 音響情報，2) 運指情報，3) 首振り情報，4) 補助的情報の検出を行う．そして，その情報を元に各種音源，音響エフェクタのコントロールが可能となっている．運指情報に関しては，尺八の指孔の周囲に4つの電極を配することで指のカザシ（押さえ方）を検出することができる．首振り情報については，ヘアバンドの後頭部に設置されたATOM8ユニット内で，加速度センサによる姿勢検出とジャイロセンサによる回転速度検出を行っている．補助的情報としては，衣装内部に着るジャケットの肩に設置された曲げセンサにより左右の上腕の上下動が測定できる他，尺八本体に設置したATOM8ユニットにより，尺八本体の姿勢や指孔とは別に設置された押しボタンの情報を得ることができる．Cyber 尺八にて得られる情報とセンサの関係を表 4.1 に示す．

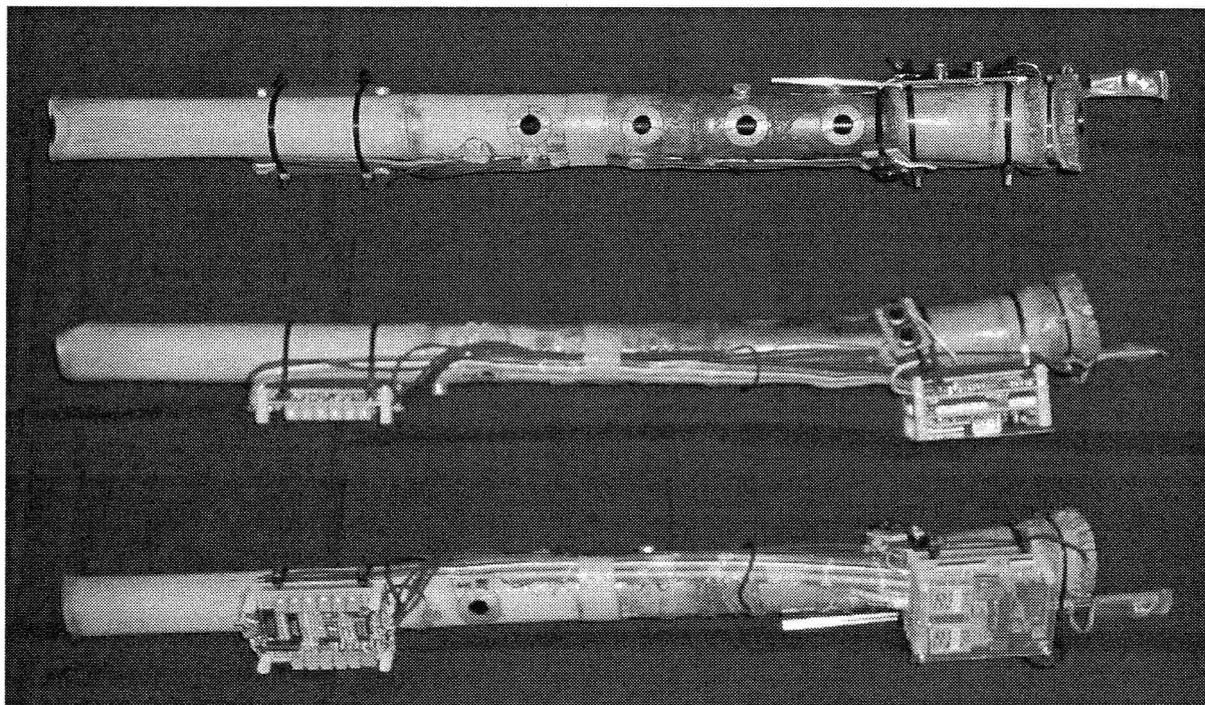


図 4.2 Cyber 尺八本体  
上) 前面，中) 横，下) 後面



図 4.3 Cyber 尺八ヘアバンド (ATOM8)

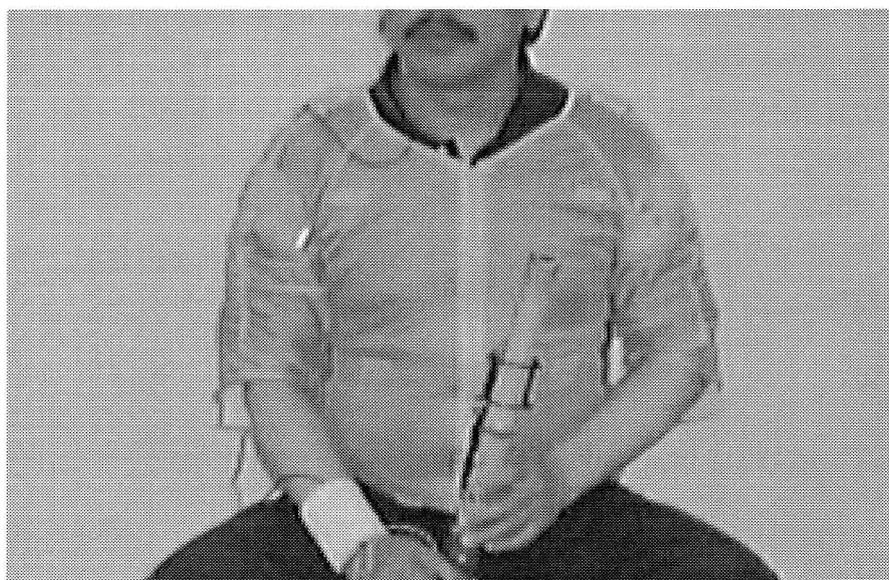


図 4.4 Cyber 尺八ジャケット

表 4.1 Cyber 尺八の各センサと得られる情報

ユニット	センサ設置部位・場所	センサ	得られる情報
ヘアバンド	後頭部のATOM8	加速度センサ	頭部の前後左右の傾斜 (2 軸)
		ジャイロセンサ	頭部の左右回転 (1 軸)
尺八本体	本体下部のATOM8	加速度センサ	尺八の前後左右の傾斜 (2 軸)
	指孔 (4 つ) 周囲	タッチセンサ	各指孔の押さえ方
	下孔部	マイク	音響情報
	本体下部	押しボタン	ボタンの押す・離す
ジャケット	肩	曲げセンサ	左右上腕の上下動

## 4.2.2 ソフトウェア環境

### 【シーン記述用ツールキット HIAT】

Max はビジュアルプログラミング環境という性質上、簡単にかつ自由にプログラム／システム設計が出来る性質を持っている。これはメリットの一つではあるが、その自由度ゆえにインタラクティブアートのシナリオエディタとして使い辛い面もある。また、複数センサ情報をシナリオ中の様々なシーンで使用したりメディア制御を行ったりする場合、データのトラフィック制御をうまく行わないとシステムクラッシュの原因になることが多い。独自制作作業が多いインタラクティブアートでは、このような事項を一々考慮せず作品の制作・編集ができるほうが制作効率が向上すると言える。そこで我々は Max 上でシーン記述と ATOM8 などのセンサからのデータフローの制御が行えるフレームワーク HIAT (Hirotsugu's Interactive Art Toolkit) を設計し、作品制作モデルの一つとして具体的な制作手順を策定した。図 4.5 に HIAT のフレームワーク概要を示す。ここでは作品全体を構成する Max パッチで扱われるシーン制御メッセージの他、MIDI 信号として送られてくるデータ列をセンサ情報として解釈するモジュール、それから得られる各センサ情報、各シーンの Max パッチ (以後シーンパッチ) から成る。また、各シーンパッチは HIAT で策定したシーンテンプレートから作成され、そのテンプレートの内部構成は図 4.6 の通りである。

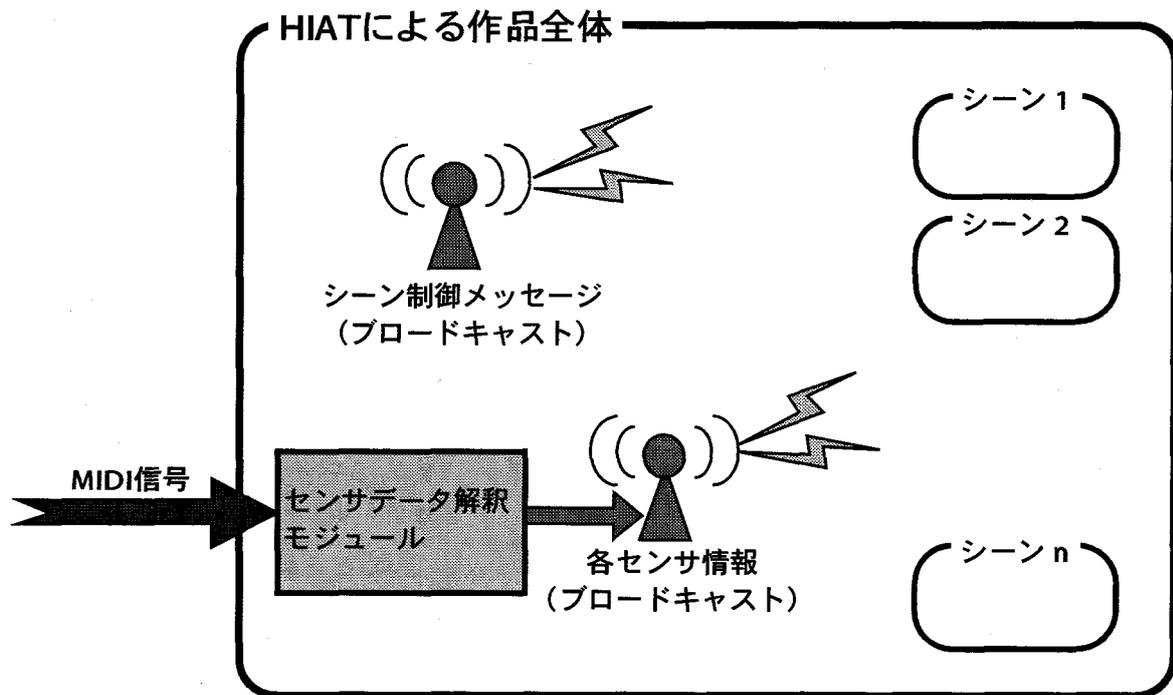


図 4.5 HIAT のフレームワーク概要

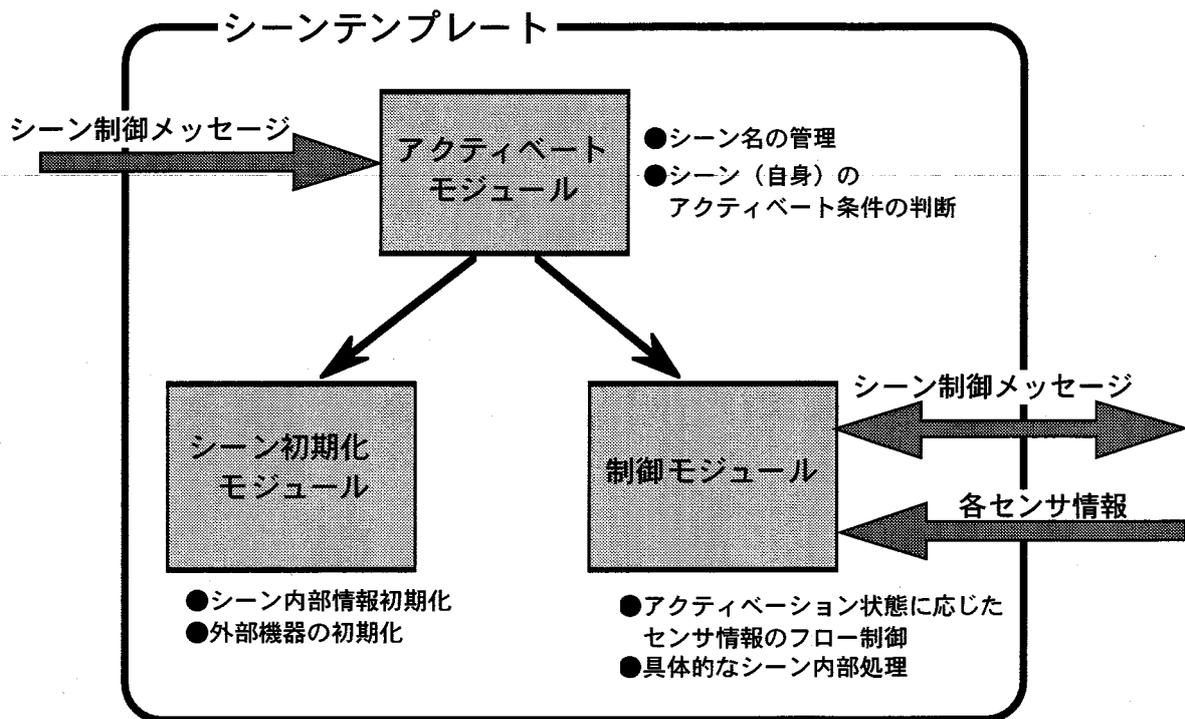


図 4.6 HIAT のシーンテンプレート概要

図 4.5 において、シーン制御メッセージと各センサ情報はブロードキャスト情報として HIAT 内部で自由に送受信できるようになっている。図 4.6 の構造を持つ各シーンパッチでは、アクティベートモジュールでシーン制御メッセージを受信し、それが自分自身をアクティベートするメッセージだと処理を開始し、ディアクティベートするメッセージだと停止する。アクティベートされたシーンは、シーン初期化モジュールで初期化を行ってから、センサ情報を受信して制御モジュールにてシーン内部の処理を始める。制御モジュール内では個々のシーン内部処理の他、他のシーンに移るためのシーン制御メッセージを発信できる。これによりシーン移動が行え、シーンによる展開がある作品の制作も可能となる。各シーンのアクティベーションは排他的なものではなく、一定時間後に別のシーンをアクティベートしたり、シーン 1 の次は同時にシーン 2 と 3 を立ち上げるといった処理も可能である。また、制御モジュールは他のシーンに対する制御メッセージも受信できるため、特定のシーンがアクティベートされた際に自分自身の処理を停止させるといった処理も記述できる。

図 4.5 のセンサデータ解釈モジュールでは MIDI 信号として送られてくるセンサのデータを各センサ毎のデータとして分別し、ブロードキャスト情報として発信する。各シーンの制御モジュールは自分のシーンパッチがアクティベートされている場合にのみ、各センサ情報の受信処理を行う。

また、HIAT には ATOM8 からのセンサ情報に対して簡単なパターンマッチングを行

う機能を Max サブパッチとして設けている。インタラクティブアートでは特定ジェスチャに反応してメディア表現を変化させるという要請も多く、従来のジェスチャ認識ほどの精度はないが、この機能により特定ジェスチャの検出が可能となっている。ここでは、検出対象ジェスチャのセンサ情報時系列ベクトルをユーザが登録しておき、随時入力されるセンサ情報に対してリアルタイム処理で登録ジェスチャを検出する。検出には、入力データの時系列ベクトルと登録ベクトルとの誤差平均を随時計算して閾値処理を行っている。検出の際には発火信号を送信するが、発火後は一定時間次の発火を抑制する不応期を設け、連続発火を制限するようにしている。閾値と不応期の設定は上記センサ情報の登録と同様にユーザが行う。以上の処理は単一センサに対する処理だが、複数センサでパターンマッチングする場合は各センサ毎に独立に閾値処理を行い、すべてのセンサに対し、発火信号が揃った際に、マッチしたと判断する。

### 【HIAT を利用した制作手順】

ここで、HIAT を利用したシンプルな作品を作る場合の制作手順を示す。

- ステップ 1. シーンテンプレートからシーンパッチを作成
- ステップ 2. シーン内部処理を記述
- ステップ 3. 作品のメインパッチにシーンパッチを登録

まずステップ 1 として図 4.7 のシーンテンプレートファイルをオープンするとシーン名の入力を求められ、入力した名前とそのパッチが自動的に保存される。以後その名前前でシーン名として管理され、独立したファイルとして存在するため、他の作品を制作する場合でも再利用が可能となる。

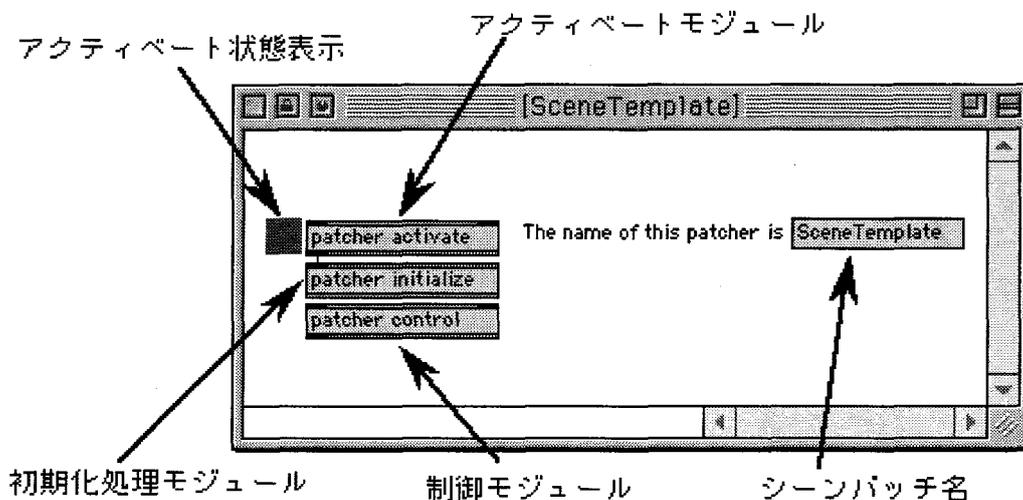


図 4.7 HIAT シーンテンプレートの Max パッチ

次のステップ2では、ステップ1で作成したシーンパッチでの具体的な処理内容を記述し、一つのシーンを作成する。制御モジュールでは、図4.8のようにテンプレートとして各センサ情報がはじめから得られるようになっており、必要でないセンサの情報はカットすることで処理負荷を減らすことができる。なお、この図ではCyber尺八の使用を前提としたものとなっている。他のセンサを用いる場合はこの制御モジュールとセンサデータ解釈モジュールをセンサ用にカスタマイズすればよく、フレームワーク全体の機能や利用方法に関しては変更する必要はない。

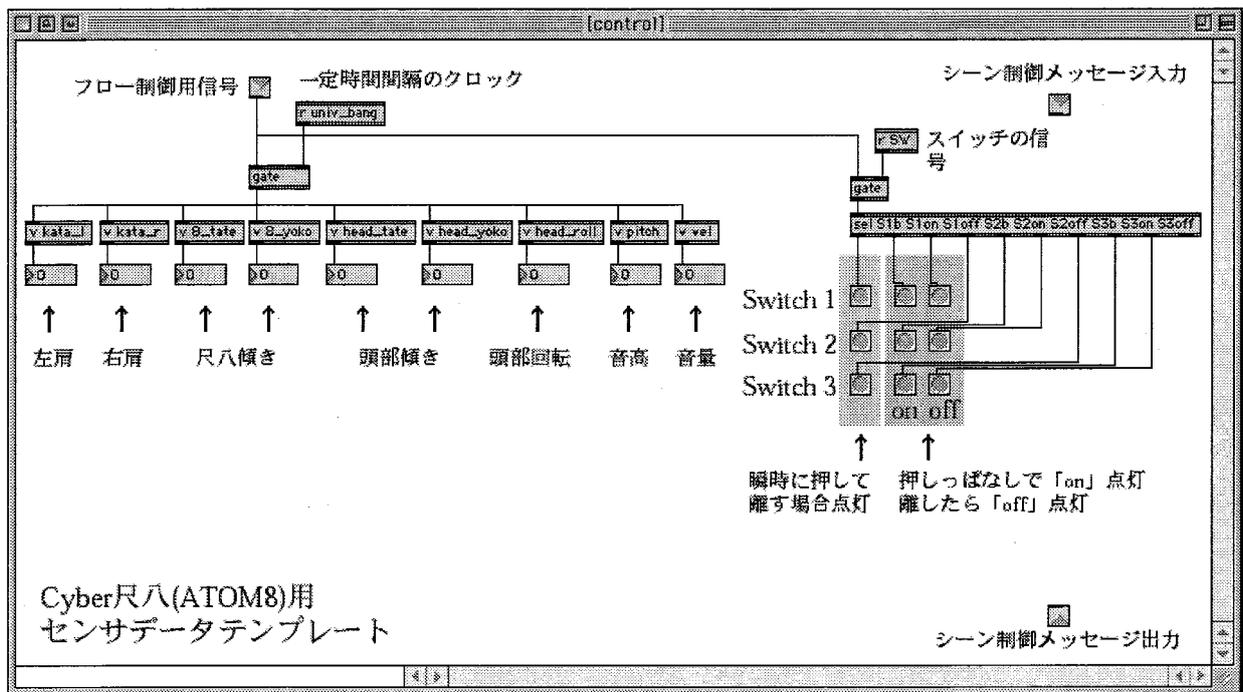


図 4.8 シーンテンプレートの制御モジュール例

最後にステップ3として、図4.9に示すように作成したシーンパッチ (Scene1) をサブパッチとして利用するメインのパッチを作成し、センサデータ解釈モジュール (sensor) を加える。

複数のシーンを持つ大きな作品の場合は、上記の手順を繰り返して、個々のシーン間で移動ができるようシーンパッチをプログラミングすることで制作できる。

以上の HIAT の処理と利用方法を、ストーリーによるシーン変化のある作品に対するコンテンツ制作モデルとして定義し、4.3 節で述べる作品の制作を行ってきた。HIAT の利用により、作品の改訂時のプログラミングが効率化した他、特定シーンのデモンストレーションが簡易に作れたり、Cyber 尺八を利用した他の作品を制作する際にシーンパッチごと流用することができるなど生産性が大きく向上した。また、この研究事例とは別のインタラクティブダンスステージでの作品制作でも同様に生産性が向上している。

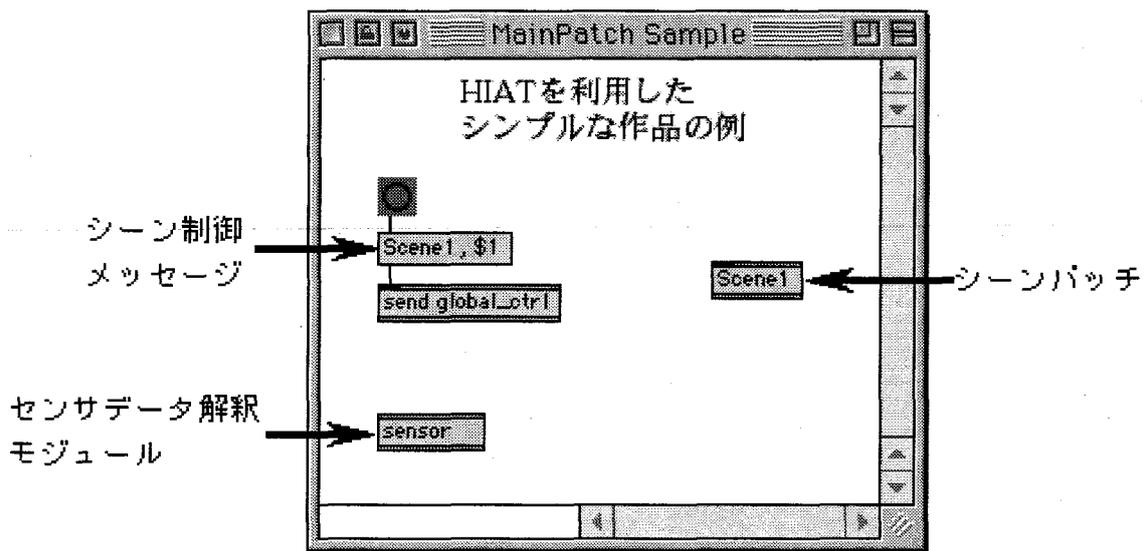


図 4.9 HIAT フレームワークによるメインパッチの例

## 4.3 「竹管の宇宙」プロジェクトについて

### 4.3.1 プロジェクトのコンセプトと経緯

本プロジェクトは、1993年から開始したインタラクティブコンピュータ音楽のプロジェクトである。メンバーは当初、志村（音楽制作・演奏）、片寄（システムデザイン）、金森（Cyber尺八製作）で始められ、後に池淵（システムオペレータ）と平井（システムサポート）が加わり、現在に至っている。

プロジェクトの技術コンセプトとしては、前述の Cyber 尺八のコンセプトに加え、演奏者の身体動作や音響効果に基づくコンピュータ演奏と人間との合奏によるライブパフォーマンスを行うこととしている。

芸術コンセプトは、単純さと複雑さが表裏一体となった宇宙観 [Simura 1993] の表出を行うこととしている。これは、西洋音楽の管楽器に比べ形状や構造が単純な尺八と、その単純さが表れる虚無僧尺八の世界感に対し、演奏者の個性によって生み出される多種多様で複雑に絡み合わされた奏法が混ざり合うことに基づいている。

これらのコンセプトのもとで制作した作品は、第1作「竹管の宇宙Ⅰ」から第5作「竹管の宇宙Ⅴ」（最新の作品）と改訂・制作され、これまで世界各地で10回以上演奏されている。その中で、第2作および第5作についてはそれぞれ ICMC94、ICMC96 にて入選した。第4作からは音響に加え、ハードディスク上に記録された映像のリアルタイム操作をも実現している。



図 4.10 「竹管の宇宙 V」 公演

### 4.3.2 演奏システム解説

演奏システムの概要図を図 4.11 に、Cyber 尺八以外の音響機材などの写真を図 4.12 に示す。

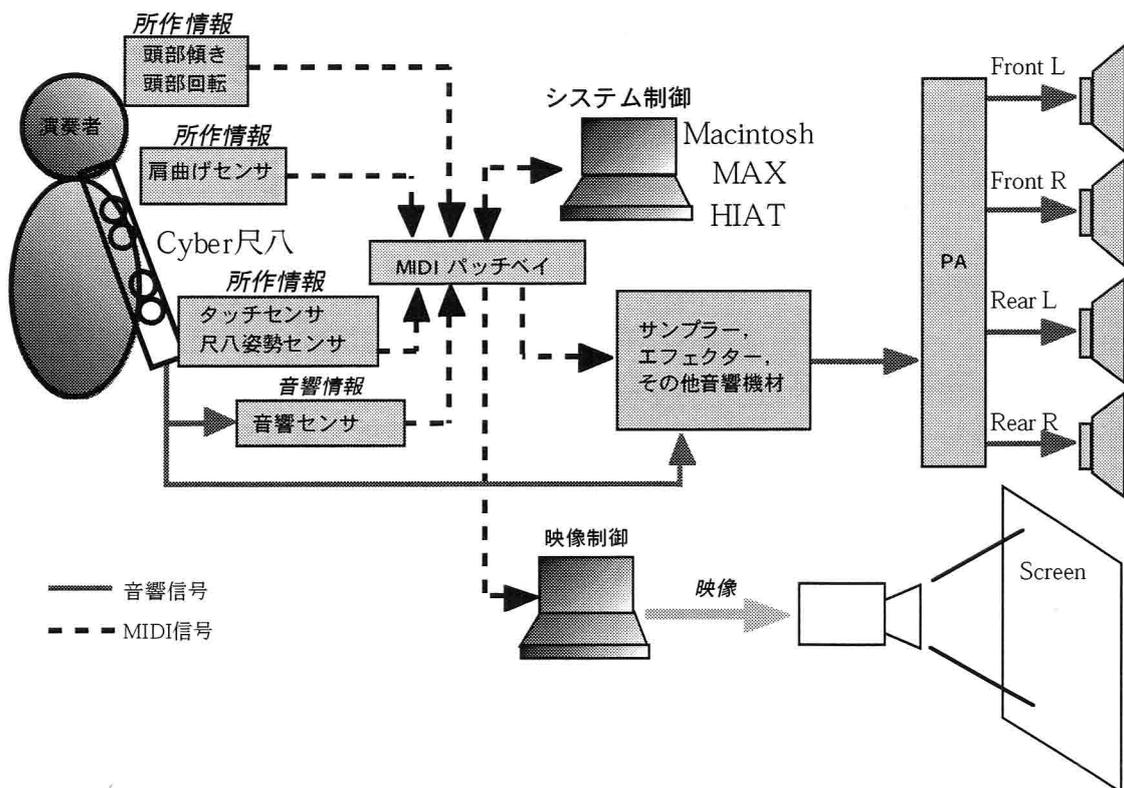


図 4.11 「竹管の宇宙 V」 演奏システム概要図

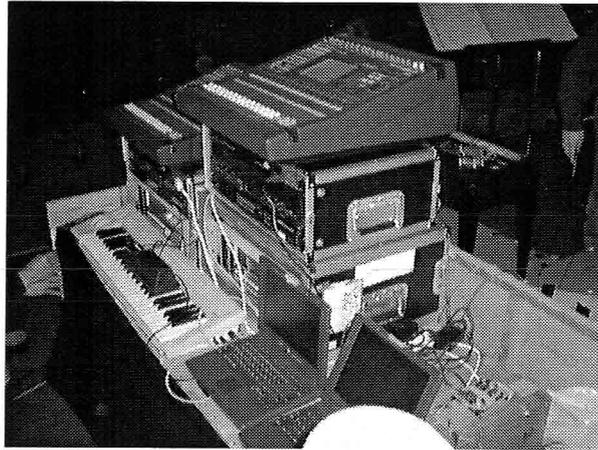


図 4.12 「竹管の宇宙 V」の音響機器とコントロール用 Macintosh  
(障害時用に機材は 2 セット用意してある)

4.2 節で述べた Cyber 尺八を演奏の所作情報と音響情報の入力デバイスとし、MIDI パッチベイを介してそれら情報がシステム制御用の Macintosh へ送られる。Macintosh では Max 上の HIAT で MIDI トラフィック制御やシーン切り替え、演奏技法の認識の処理を行い、サンプラーやエフェクタなどの音響装置を制御する MIDI 信号を出力する。尺八の音響やサンプラーの出力は音響ミキサーを経て 4 チャンネルステレオとして出力される。また、Cyber 尺八のボタンスイッチの一つは緊急時用に設定してあり、接続されている MIDI 機器のシステムリセットをかけることができる。これは、MIDI 機器がシステムパニックに陥った場合に、音の鳴りっぱなしや異常音発生等の状態を回避するなど、システムの保護機能として働く。「竹管の宇宙」シリーズの場合、HIAT で記述されたシーンは、大きく分けて 10 あり、そのうちのいくつかはそれぞれ細分化されたサブシーンを持っている。シーンの移動は、認識された特定のジェスチャもしくは Cyber 尺八本体に仕込まれたボタンスイッチにより行う。各シーン内におけるサブシーンの進行については自由に移行でき、ライブパフォーマンスならではのインプロビゼーションによる自由な演奏が可能となっている。図 4.13 に「竹管の宇宙 V」のシーン遷移図を示す。これら HIAT によるシーン/サブシーンの区切りを、次節で示す作品のストーリー展開に対応付けることにより演奏効果をダイナミックに変化させることに成功している。

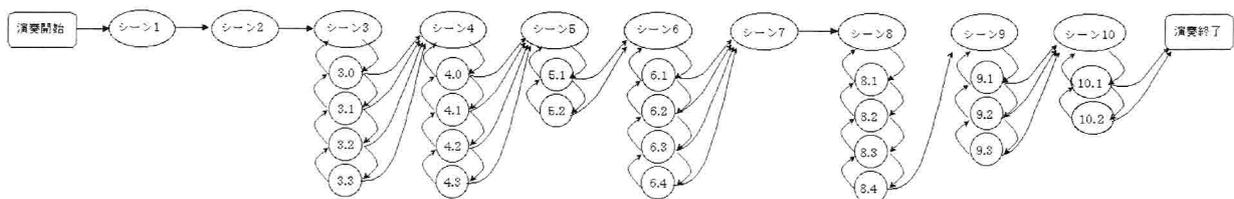


図 4.13 「竹管の宇宙 V」シーン遷移図

### 4.3.3 作品・演奏解説

本プロジェクトの作品の演奏には、数百年にわたって尺八の達人たちによって伝承また練り上げられてきた尺八古典本曲の伝統的演奏技法が駆使されている。これを前述の演奏システムの仕組みを用いて、演奏者が尺八の演奏と同時にコンピュータを介してシンセサイザーを生演奏する作品となっている。その延長で、「竹管の宇宙V」では人間と演奏システムが伝統的演奏様式である「掛け合い」による吹奏を再現し、一つの音楽空間を創造する演奏内容となっている。

「竹管の宇宙」シリーズに貫かれた音楽テキストは、尺八古典本曲「鶴之巢籠」にまつわる物語をテーマにしている。「鶴之巢籠」は、歌舞伎「仮名手本忠臣蔵」にも取り上げられるほど有名な曲だが、実際には同名異曲が十曲以上存在する。もともと、古典本曲には楽譜が存在しないため、核となる概念あるいは「物語（テキスト）」と曲を特徴付ける「手（フレーズ）」のみが存在し、これを各地の虚無僧が自分の手と楽器尺八のテクノロジーを用いて数百年にわたって練り上げ、整曲したものと考えられている[志村 1988]。本作品では、この「手」と「楽器」の役割を現代のテクノロジーであるコンピュータや電子技術によって、さらに拡張する試みとして制作を行ってきた。その意味で、尺八本曲の伝統的生成原理に則って生まれてきたコンピュータ邦楽「電腦巢籠」[志村 1998]として位置付けられる。

「鶴之巢籠」共通に表現される物語は次のようなものである。1) 親鶴が天空より飛来し、巣を作る場所を探す、2) 巣を作り、卵を生む、3) 鶴の子育てによる親子の情愛の深まり、4) 小鶴の巣立ちによる親子の別離とやがて来る親鳥の死。この一連のテキストを背景とし、親子の愛、父母の恩が物語のテーマとなっている。これは、そのまま人間の親子の情愛に対する教えのほか、宗教的な曲ではないが仏の慈悲心にも通ずるものとして、精神修養の曲とされている。表 4.2 に物語の流れと HIAT のシーンとのおおよその対応を示す。

表 4.2 「竹管の宇宙 V」の物語とシーンの関係

パート番号	物語の要約	シーン番号
1	親鶴が天空より飛来し、巣を作る場所を探す	1, 2
2	巣を作り、卵を産む	3, 4, 5, 6
3	鶴の子育てによる親子の情愛の深まり	7, 8
4	子鶴の巣立ちによる親子の別離とやがて来る親鶴の死	9, 10

1) の場面は、冒頭で「竹調べ」と呼ばれる尺八の演奏手法を用いており、長い持続音を中心に演奏する事で息を整える。これにより、尺八奏者は呼吸を整えて精神統一を行う。また、その後の演奏でプラン通りに演奏するための音楽世界への導入的内容となっている。2) の場面では、音楽的コンテクストを考慮しつつ、様々な演奏手法を用いた表現で音世界に遊んでいる内容である。その中でシーン5,6にかけては3) の場面に対して徐々に盛り上げていく演奏を行う。3) では、情景を多種多様な演奏技法と音色表現で行い、後半は激しい演奏で非常に盛り上がる内容となっている。最後の4) の場面ではシーン9にて盛り上がりを突然静めることで、音楽的コントラストをつけて親子の分かれと親鶴の死を表現する。

また、シーン10には物語全てに対する「結び」の旋律が含まれており、音楽的な締めくくりを行う。この4) では、その直前までの演奏に比べて音数がかなり少なく、さらに最弱音で吹奏し続けるため、一音々々に大変神経を使って演奏を行っている。また、楽曲中では鶴の鳴き声を描写するため難易度の高い技法「束音」をシーン4,5,6,9で用いており、その中でも最高音域で行われるシーン9が技術的に一番難しいシーンと言える。

ここで、「竹管の宇宙V」の譜面例を図4.14に示す。

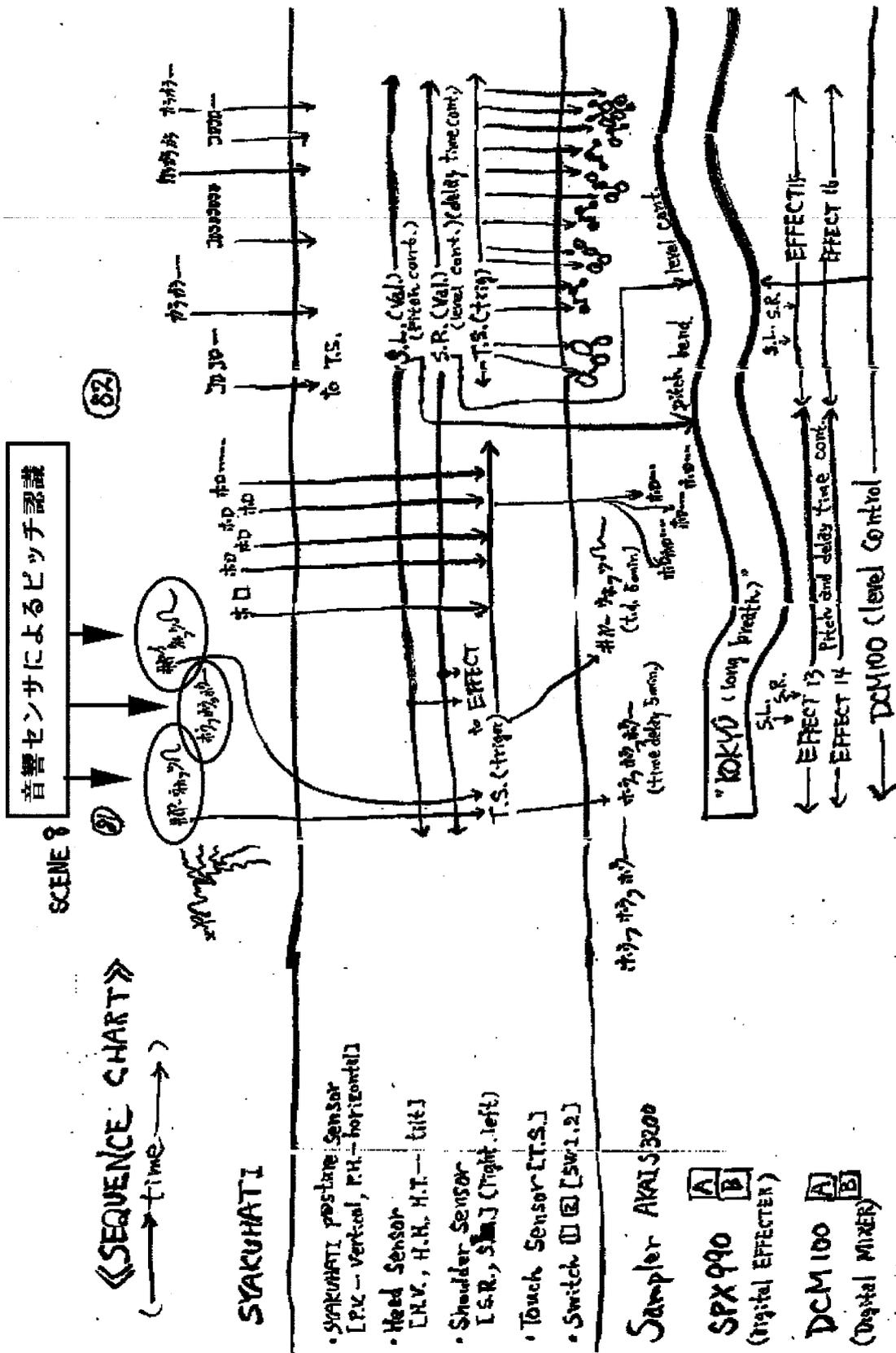


図 4.14 「竹管の宇宙 V」の譜面例

## 4.4 生理的緊張状態の計測

「竹管の宇宙」のようなライブ演奏を行う作品では、演奏内容に加えて演奏者の緊張感等も聴取者へ伝わっていると考えられる。緊張感は芸術的印象に対して大変重要な意味を持っていると言え、本プロジェクトでは各公演に対するレビューの一方法として作品が持つ緊張感や演奏者の演奏中の緊張状態に関する考察を行うことにした。ライブ演奏における緊張感や感情の研究としては、千住らによる形容詞を用いた心理的な研究 [Senju 1987] が挙げられるが、生理的研究で演奏者や聴取者の生理指標を計測している研究は少ない。そこで、本研究プロジェクトでは 1997 年から演奏者と聴取者両方の自律神経系生理指標を計測し、生理的緊張状態に関する実験を行っている [薦田 1997][Katayose 1998][Katayose 1999][平井 2000]。この実験に伴い、実際のコンサートでも演奏にはほぼ支障なく利用できる生体信号計測システムを構築した [金森 1999]。4.4 節では作品の考察に用いるための生体信号計測システムと、このシステムで得られる自律神経系生理指標について述べる。

### 4.4.1 無線携帯型生体信号計測システム

コンサートのような場面で生体計測を行う際の問題点の一つとして、計測被験者への拘束や動作によるアーティファクトの混入が挙げられる。これらの問題をできるだけ少なくするため、まず小型化かつテレメータ化することで計測被験者が自由に動き回れるようにした。そして生体信号を計測する電極やピックアップもなるべく拘束感が少ない小型のものを用意した。また、観客の生理指標も計測できるよう複数人同時計測できるよう無線多重化を行った。構築した生体信号計測システムの概略図と概観、装着例をそれぞれ図 4.15-4.17 に示す。

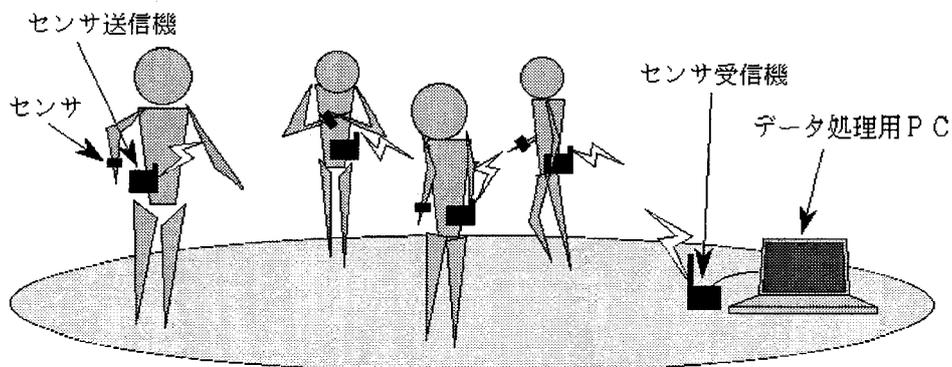


図 4.15 無線携帯型生体信号システムの概略図

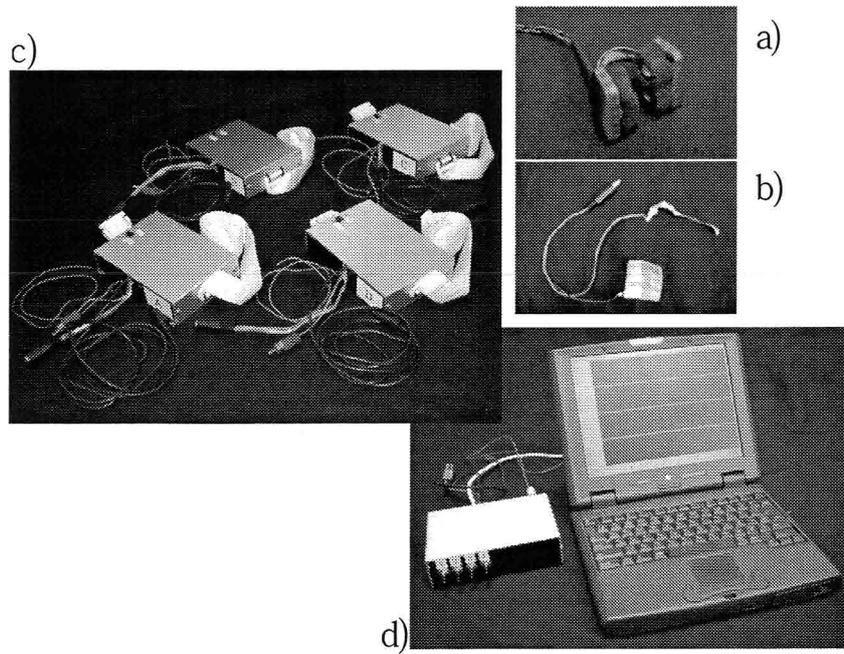


図 4.16 無線携帯型生体信号計測システム概要  
 a) 脈波ピックアップ, b) 皮膚アドミタンス用ステンレス電極,  
 c) 送信機, d) 受信機とノート PC

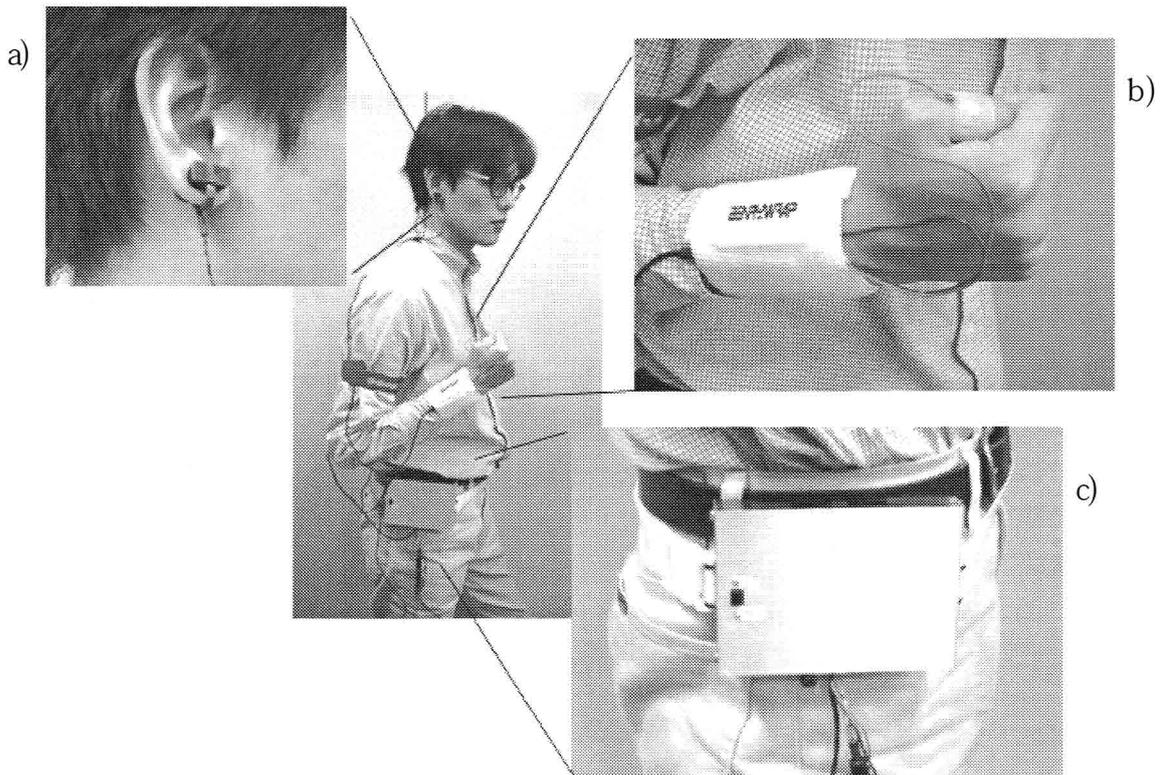


図 4.17 センサと送信機の装着例  
 a) 脈波ピックアップ, b) 皮膚アドミタンス用電極, c) 送信機

この生体信号計測システムでは、装着者の耳朶もしくは指先に取り付けたピックアップから光電容積脈波を、手首と親指に装着したステンレス電極から皮膚アドミタンスを計測することができる。被験者が装着する無線送信機では、脈波と皮膚アドミタンス値をサンプリングして受信機へ送信する。このシステムでは複数の送信機が4台まで同時使用可能であり、受信機は複数送信機から受信したデータをマージしてMacintoshへ転送する。そしてMacintosh上では計測データの記録と生理指標の計算が行われる。

脈波と皮膚アドミタンスはどちらも自律神経系活動として挙げられる。このシステムでは、瞬時心拍数とほぼ同等に扱える瞬時脈拍数を脈波に関する生理指標として計算する。心拍数は自律神経をなす交感神経と副交感神経の両支配を受けるもので、交感神経優位な緊張・集中状態で上昇、副交感神経が優位な状態では下降し、脈拍数も同様に变化する。一方、皮膚アドミタンスは皮膚電気活動 [Boucsein 1992] の一種で、電極間に交流電圧を印加してその電極間のアドミタンス値を計測する。皮膚電気活動は、交感神経にのみ支配される汗腺の発汗活動で起こる電気的变化を捉えるものであり、脈波などと合わせて生理心理学 [藤澤 1998] の分野では古くから扱われてきた。皮膚アドミタンスから得られる生理指標は、0.1Hz以下の長期的変化である皮膚アドミタンス水準 (SYL) と0.1Hz以上の短期的変化を表す皮膚アドミタンス反応 (SYR) があり、両方とも値が大きいほど緊張・集中状態として扱われる。

#### 4.5 生理的緊張状態の計測とそれに基づく作品の考察

作品制作活動の考察を目的として、制作活動の一つである作品の公演に対し、前述のシステムで計測される生理指標から演奏者の生理的緊張状態を判断し、作品とその演奏活動に対する考察を行った。具体的には、リハーサルやコンサートなどの演奏状況による演奏者の生理指標の相違や、演奏中の生理的緊張状態の変化に着目し、演奏者の内観と生理指標とを比較、考察を行っている。以前の葛田らの論文<sup>10</sup>では実験室における演奏を扱った。本節では実際のコンサート公演で実験を行い、演奏時の生理指標に基づいて考察を行うものである。これまで、生理指標計測を伴った公演は三回行われた。コンサート1は1998年3月の東京での公演（観客数約300人）、コンサート2は1999年5月の大阪での公演（観客数約25人）、コンサート3は2001年4月の大阪での公演（観客数約80人）である。コンサート会場の広さは2と3で同じ程度であるが、コンサート1のみかなり大きなホールで行われた。演奏者の生体信号計測装置の装着した写真を図4.18に示す。また、各コンサートの風景を図4.19, 4.20, 4.21に示す。

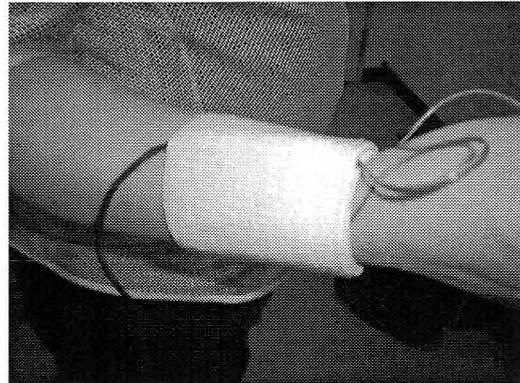
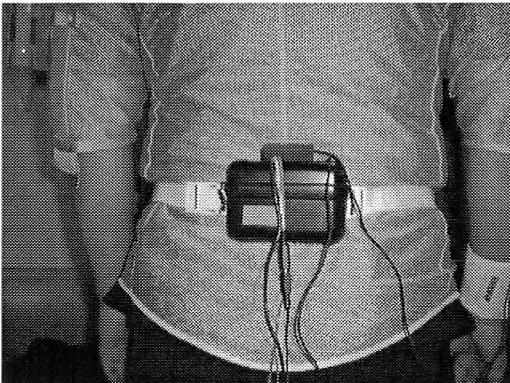
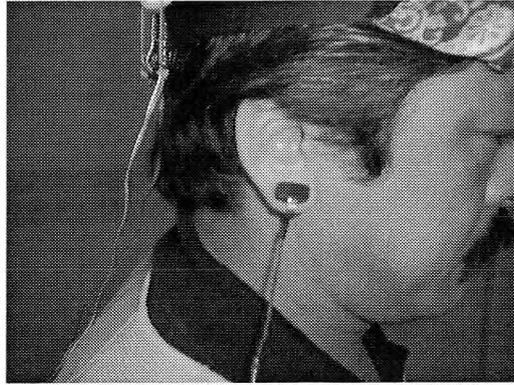


図 4.18 演奏者による生体信号計測システムの装着

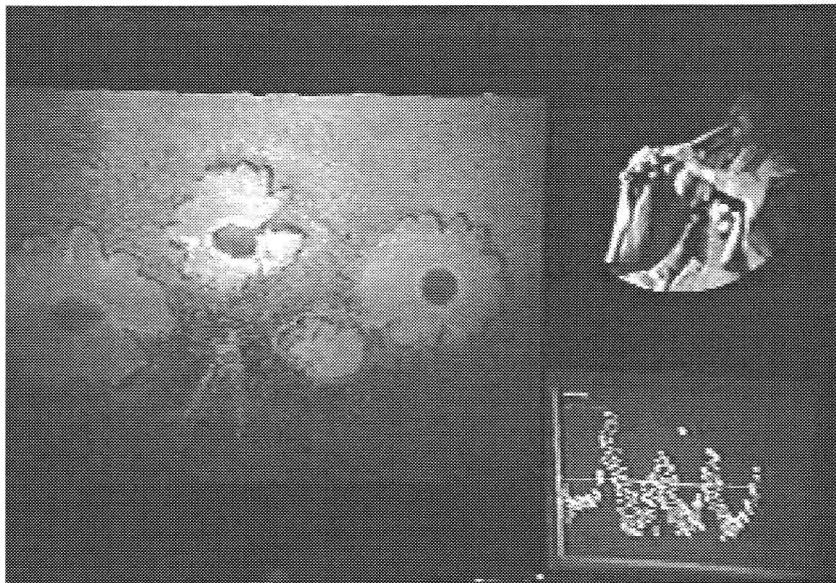


図 4.19 コンサート 1 での本番演奏 (1998 年 3 月)



図 4.20 コンサート 2 でのリハーサル風景 (1999 年 5 月)

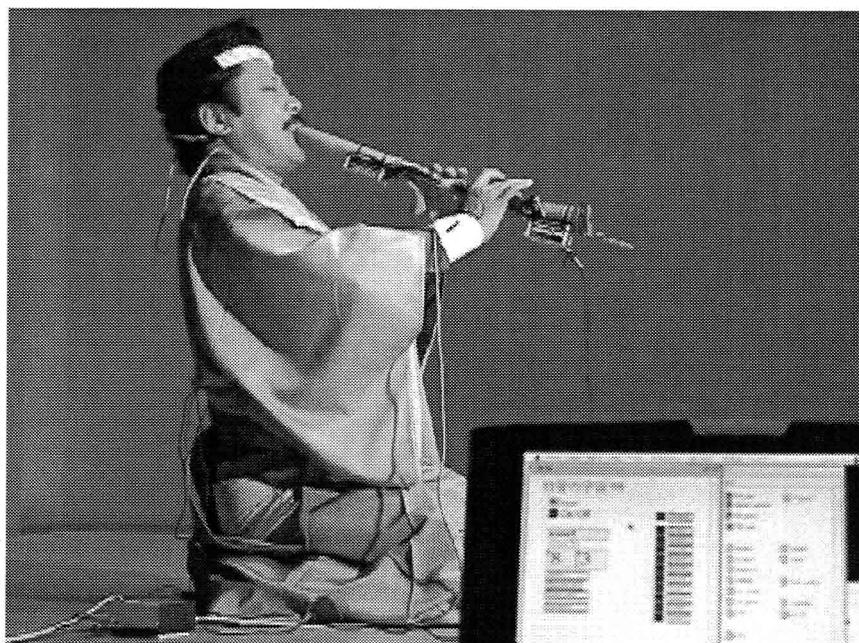


図 4.21 コンサート 3 での本番演奏風景 (2001 年 4 月)

また、コンサートでは聴取者やコンサートスタッフも含めた実験も行っている。しかし、これまでに得られたデータでは被験者毎に全く違う傾向を示しており、知見や結果をまとめるには至っていない。以下、本節では演奏者に対する各状況での生理的緊張状態と楽曲中の変化についての知見を述べ、考察を行う。

#### 4.5.1 異なる状況における演奏者の生理的緊張状態の比較

まず、比較のための基礎データとして演奏者の平静時の生理指標を各公演毎に練習日やコンサート当日のリハーサル前に計測した。その結果、それらの差はほとんどみられずコンサート当日でも平静時は安定した生理指標が得られることを確認した。その上で、普段の練習時、コンサート当日のリハーサル、コンサート本番と異なる状況における演奏中の平均的な生理指標について比較した。三公演について、各状況の演奏中の平均心拍数を図 4.22 に示す。

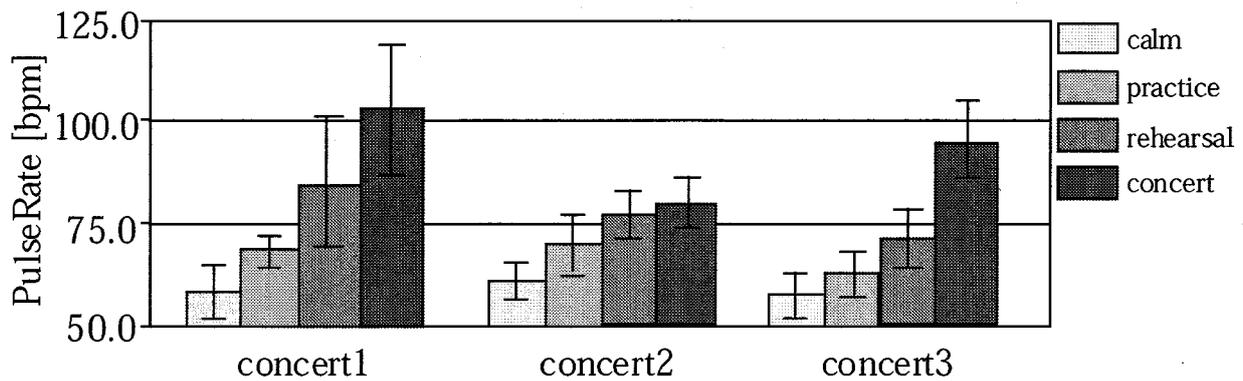


図 4.22 演奏者の演奏中の平均心拍数

この図から、どの公演においても平静時・練習・リハーサル・コンサート本番の順に平均心拍数が高くなっていることがわかる。皮膚アドミタンス反応についても同様の結果が出ており、聴取者の前という作品制作の最終段階であるコンサート本番にて演奏する状況が、演奏者にとって一番高い緊張状態の場面だと解釈できる。また、観客数の多いコンサートほど本番演奏時の心拍数も高くなっていることも読みとれる。

#### 4.5.2 演奏者の演奏中の生理的緊張状態と内観、作品内容との比較

次に、演奏者（作曲者）の主観による楽曲中の相対的緊張度変化と、実際に演奏した際の生理指標との比較を行った。図 4.23 に示す楽曲中の緊張度ではシーン 4 で一つめの盛り上がり、シーン 8 で最大の盛り上がりを見せる場所となっている。その後シーン 9, 10 にかけては緊張度としては下がる曲調である。

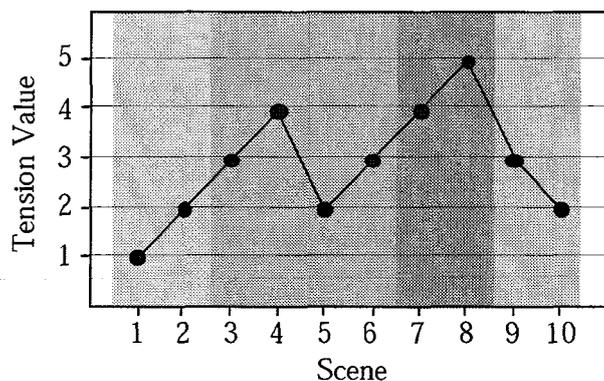


図 4.23 演奏者の主観による各シーンに対する緊張度

実際の演奏時の生理指標を見てみると図 4.24 に示すようにシーン 9 以降では緊張状態が下がらずにより増加している。他の公演においてもこの場面では増加もしくはそのまま持続している傾向を確認しているが、4.3.3 節の解説で述べた通り演奏にはかなりの集中が必要とされる部分とも言え、このことは生理的緊張状態が高い状態を保っている説明になりうる。結果的には作品の意図する緊張度と演奏行為による緊張状態とは別個のものであることを示していると言える。

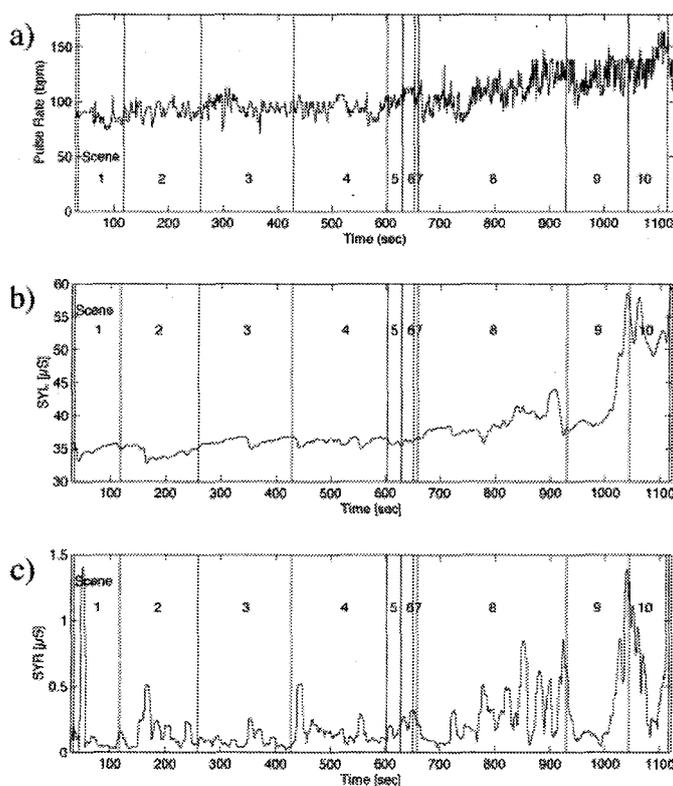


図 4.24 演奏者の自律神経系生理指標 (コンサート 1 にて)  
a) 脈拍数, b) SYL, c) SYR

また、演奏者からは「尺八本曲の精神を継承しようとする演奏表現においては、演奏に対する緊張感をいかに全曲に渡って維持できるかを大切にしている」というコメントが得られており、5.1 節の平静時との比較から、図 4.24 の結果に合っている。このように、内観と生理的緊張状態の一致が見られることから、「演奏に対する心構え」という観点から作品演奏中の生理的緊張状態のモデルを構築することができることが示唆された。このことを踏まえて、システムへの生理的インタフェースの実現へ向けて、今後とも公演時の実験を重ねていくことが必要である。

## 4.6 第4章まとめ

本章ではインタラクティブアート創作システムの研究として、インタラクティブアートプロジェクト：「竹管の宇宙」を採り上げた。そして、プロジェクトで研究開発を行った、新世代楽器"Cyber 尺八"とシーン記述ツールキット"HIAT"について解説を行った。また、本プロジェクトで制定した HIAT による作品制作手順を述べ、実際に制作した作品やその演奏ポイントについても解説を行った。本プロジェクトでの作品は、ICMC コンサートセッションで採択され、芸術・技術の双方から一定の評価を得たものである。あくまでもケーススタディではあるが、ここでの総括がコンテンツ制作の実例としてインタラクティブアート制作の分野に多少なりとも寄与できることを期待している。

本章の後半では、演奏者の生理的緊張状態の計測の説明と、演奏者自身の内観を元に作品制作に対する考察を行った。芸術における感性や内観に関して、絶対的な主張を行うことは困難であるが、表層的な曲想よりもそれを表現するための深層の精神状態に呼応する生理指標が計測されたと考えている。このことは、これまで口伝によってその技や心構えが伝承されてきた伝統芸能での精神状態を探るという意味で興味深い。今後も実験を行い続け、より様々な知見を得ることが課題であると考えられる。また、得られた知見を元に生理的インタフェースとしてシステムに導入し、作品制作にフィードバックすることも今後の課題である。加えて、聴取者の反応も含めた解析を続けていき、緊張感の伝搬などについて研究していくことが必要と考えられる。

本プロジェクトの今後については、Cyber 尺八を含む演奏システムに関して、コンパクト化と仕様のオープン化を予定している。前者は、かつて虚無僧が一管の尺八を携えて諸国を行脚し、多くの尺八本曲の名曲を生み出した状況の再現を目標としている。これは、シンセサイザーやエフェクタの音響処理をすべてソフトウェアで行うことで、Cyber 尺八一つとノート PC 一台という構成が可能と考えている。また、処理の高度化によって、プロの演奏家がより納得のいく楽器へと完成させることも目標としている。後者のオープン化に関しては、多くの作曲家・演奏家に対して様々な作品を制作・演奏できる環境を整えることを目標としている。ヒューマンインタフェース的観点から技能伝承システムとしての可能性もあると考えられる。



## 第5章 入浴状態を表現するサウンド風呂システム

本章では、家庭用浴室でアメニティ空間を提供するという産業ニーズの基づいて行った研究について述べる。ここでは家庭用浴槽での入浴状態をインタラクティブなサウンドとして表現するシステムについて研究を行った。このシステムはユーザの音楽的能力や自主性を特定しない、一般向けの音楽インタラクティブシステムである。また、この研究は音響ディスプレイシステムとして考慮すると、ヒューマンインタフェースの情報デザインに関する研究とも位置付けられる。さらに情報家電のアプリケーションに関する研究としても位置付けることができる。

研究の具体的内容としては、浴槽内で起こる入浴者の動作を湯水の動きとしてセンシングし、インタラクティブなサウンドとして表現するシステムを開発した。これにより入浴者自信がサウンドを楽しみながら入浴できるアメニティ空間を提供した。また、音響ディスプレイシステムとして利用し、浴室外の人がそのサウンドを聞くことで入浴者の状態把握を可能とし、入浴事故防止にも応用できることも確認した。ここでは家庭の既存設備である給湯機の水圧センサを利用しており、導入コストも低く抑えられる実用的な音楽インタラクティブシステムの研究である。

## 5.1 はじめに

センシング技術の向上と家庭内ネットワークの普及に伴い、人間の日常生活の行動計測に関する研究が盛んに行われている。その例として、ウェルフェアテクノハウスの研究[高木 1998]や橋本らによる研究[橋本 2001]が挙げられ、センサを多数設置した家屋内で日々の生活行動を計測している。ほかに家電製品の使用状況を元に日常生活のデータを記録する研究[和辻 2001]も行われている。これらは無拘束で人間の行動や生活状況を記録し、安否確認や健康管理を行うことが目的である。計測された行動情報の提示については、現時点では家電製品やパソコンの画面など主に視覚ディスプレイを利用し、文字による情報が主流となっている。この既存の機器での直接的な情報提示に対し、MITの石井らによるTangibleBitsプロジェクト[石井 1998]では感覚的に把握できる情報提示インタフェースの研究を行っている。ここでは、水の波紋による照明の模様を利用してデータを表現するWaterLamp[Dahley 1998]のほか、天井近くに多数設置した風車の回転で人の混雑具合を表現するPinwheels[Ishii 2001]など、実世界の建築空間にあるものを利用した例をAmbientMediaとして示している。

本研究事例では、家庭用浴室を対象に行動計測と情報提示の両方の課題に取り組んでいる。ここでは、入浴者の状態をサウンドとして提示することにより、浴室外で入浴状態が把握できるシステムの研究を行っている。このシステムは、浴槽内の湯水の動きを計測することで入浴中の動作に関する情報を抽出し、サウンドとして表現するものである。また、入浴者は自らの動作が作り出す湯水の動きでインタラクティブなサウンドが楽しめ、アメニティ効果も期待できるシステムとなっている。

本章は、この入浴状態をサウンドとして提示するインタラクティブサウンド風呂システムについて述べる。5.2節にて本研究事例の目的と位置付けを示す。5.3節にて湯水の動きから入浴中の動作や状態を計測する手順について述べ、5.4節では試作したシステムで得られる情報と、サウンドのデザインについて解説する。また、5.5節で評価実験を行った結果について述べる。

## 5.2 この研究の目的と位置付け

日本における入浴事故の死者数は交通事故による死者数より多く、年間約1万4000人にもものぼることから、入浴時の安全管理が課題となっている。これに対し、浴室内に設置したイメージセンサで動き検出を行って安否確認する技術[SANYO 2001]などが実用化されつつある。我々も浴槽心拍計の開発のほか、水圧センサを用いた入浴中の呼吸計測[平井 2001]など、入浴者の健康管理も含めた安全管理技術の研究に取り組んでいる。これらの入浴事故の検出技術が研究される一方で、安否情報を家族に知らせるための情報提示技術も必要とされている。これは入浴事故は高齢者に多く、その大半は独居老人ではなく家族と同居しているからである。そこで我々は、安否情報の知らせ方に

ついて事故が起こった時点で明示的に警告を発するのではなく、入浴状態を家族が感覚的に把握し、何か変化があれば気付くことができるシステムの実現を本研究事例での目的とした。具体的には入浴状態や動作を表現するメディアにサウンドを導入し、浴室外へ提示することを考案した。また、そのサウンドを浴槽内の入浴者の動作に合わせてインタラクティブに変化させることで、入浴者が自ら楽しめる浴室空間の演出も考慮した(図5.1参照)。これは入浴者がその状態を意図的に情報発信することにも繋がり、浴室外では入浴状態の感覚的な把握がより可能になるとも考えられる。

以上より、本研究事例は入浴者をユーザとして捉えた場合は音楽インタラクティブシステムの研究、浴槽外の人をユーザとして捉えた場合は AmbientMedia [Ishii 2001] と同様の感覚的な情報提示インタフェースの研究、という2つの位置付けで研究を行った。

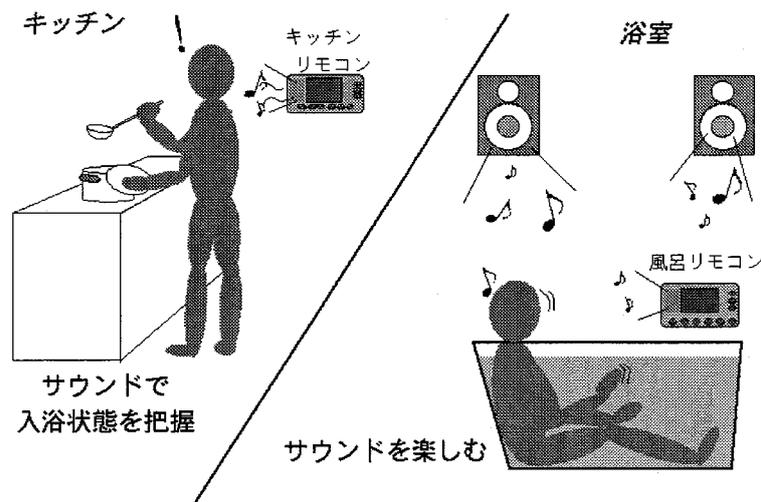


図 5.1 システム利用想定図

浴室で入浴状態に関係する媒体にはまず湯水が挙げられる。そこで、水の動きをサウンドとして表現するシステムの事例としては、水面の反射光を受光素子で計測して利用する WaterMachine [佐近田 1998] や、蛇口などに取り付けた流量計を利用した TangibleSound [米澤 2000] などアート作品が挙げられる。しかし、浴室は水場であることからセンサの電気配線を行えば感電の危険を伴うため、浴槽から導管を通じて給湯機内に設置されている水圧センサを用いることとした。この水圧センサは、既に一般家庭に普及している全自動風呂システムの自動湯張り機能にて水位計測を行うためのものである。これを利用すれば、安全面で問題ないうえ、既存の設備を有効利用できる利点もある。この水圧センサは水位変化だけでなく水面の波が計測できることも呼吸活動計測 [76] の予備実験でわかっている。これを入浴時の動作にも適用し、その時の水圧変化を入浴状態の情報元としてサウンドのインタラクティブな制御に用いることにした。また、そこで鳴らすサウンドには環境音楽的な要素を含める事で、リラクゼーションやヒーリング効果が得られるようなものを制作することとした。

## 5.3 水圧センサによる浴槽内の湯水計測について

浴槽の湯水に関して起こり得る入浴のイベントを挙げると次のものが考えられる。

- ・湯の温度差を攪拌するためにかき回す
- ・洗面器や手桶で湯をすくう
- ・湯に浸かる
- ・浴槽内で腕や体を動かす
- ・浴槽から出る

これらイベントを水圧変化として計測するにあたり、センサの特性や連続的な計測、浴槽の形状などの事項が考えられることから、まずは基礎的な水圧計測を行い、それから入浴時のイベントについて計測を行った。本節ではその内容について述べる。

### 5.3.1 水圧センサ出力の連続計測

全自動風呂システムでは、断続的に水圧の平均値を計測してその時点の水位を求め、湯張り制御を行っている。入浴者の動きによる水位変化や波打ちなどの情報を計測するには、断続的でなく連続的に水位を計測する必要がある。そこで、まずは浴槽に一定の水量を溜め、水面にほぼ波がない状態で水圧センサの出力電圧を連続的に計測したところ、図5.2のようになった。ここでは1kHzでサンプリングしてある。信号にはノイズが重畳されているため、ノイズ成分を調べたところ20Hzの高調波が見られた。しかし、人間の動作速度を考慮すると20Hz以上の速度はありえないため、単純に20Hz以下のカットオフ周波数を持つローパスフィルタ処理を行うこととした。また、このノイズは他機種 of 給湯機でも確認されており、一般的な前処理として必要である。次節で述べる試作システムではこのノイズは移動平均フィルタで除去している。

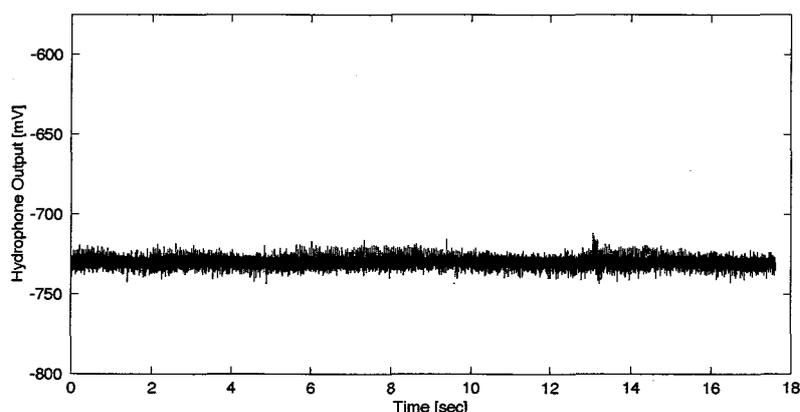


図 5.2 水圧センサ出力

### 5.3.2 浴槽内水量と水圧センサ出力との関係

入浴時と非入浴時などの判断を行う場合や、水面の波の大きさを定量的に扱う場合には、具体的な水位の数値を求めることが望ましい。本研究事例で用いた浴槽（図 5.3 参照）を含め、高さ方向に対する水平面の形状や面積は浴槽の形状毎に違うため、水圧と水位との関係は浴槽毎に計測する必要がある。しかし、一般の浴槽は底が水平でないため水位の基準点は一様には決め難い。そこで、代わりに水量と水圧との関係を計測した。ここでは浴槽に一定量の水を足し、そのときの水圧センサ出力の 10 秒間の平均値を計測値とした。その結果を図 5.4 に示す。これから、浴槽内壁の形状に則する微妙な変化が見て取れるが、概して水量に対してほぼ一定の傾きと言える。また、全身浴の場合には通常 200~250 リットル程度の湯水を溜めることから、5.4 節の試作システムではこの近辺の水量でのセンサ出力を直線として近似し、水位を換算することとした。ちなみに、図 5.3 の浴槽における換算では 1 リットルの水量で約 1mm の水位の変化となる。

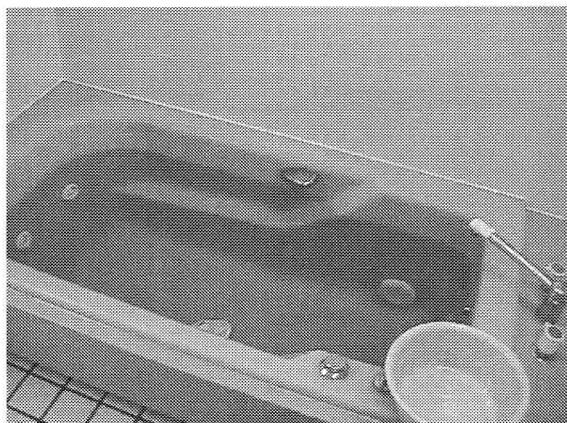


図 5.3 使用した浴槽

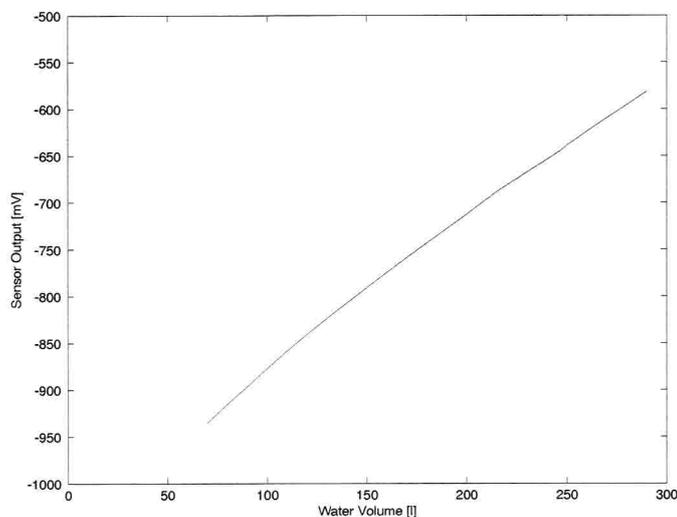


図 5.4 水圧センサ出力と水量との関係

### 5.3.3 イベント毎のセンサ出力の計測

実際に浴槽で入浴した際の水圧センサ出力を連続的に計測した。ここでは、図 5.2 で示した非入浴時の水面の揺れがほとんどない場合を基準とし、その他のイベント毎に計測を行った。その結果を図 5.5 に示す。

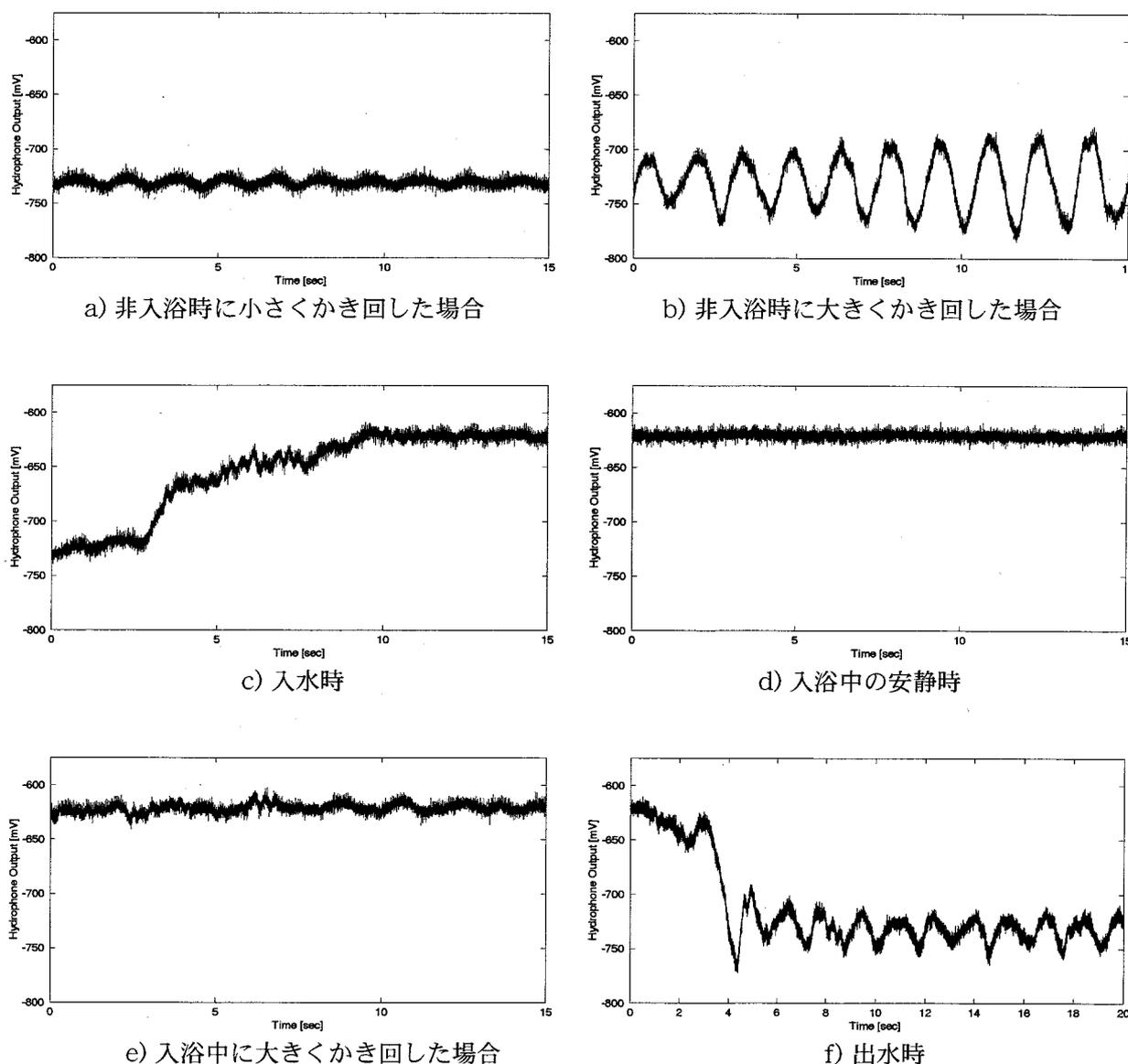


図 5.5 各動作に対する水圧センサ出力

a) と b) は非入浴時に洗面器で湯水をかき回して波を起こした場合のセンサ出力である。b) の大きくかき回した場合にはかなりの水圧変化が起こっていることがわかる。c) は入水時の変化であるが、足先から入って、座り込んで肩まで浸かるのに徐々に水位が高くなるが見て取れる。それに対して f) の出水時は入水時に比べて立ち上がるのが

早い場合、急激に水位が下がっていることがわかる。また、立ち上がった後、水面に比較的大きな波が起こっていることもわかる。入浴中のイベント e) については、非入浴時のかき回す場合ほど、水圧センサ出力には変化は現れていない。これは、入浴中は浴槽内に身体があるために、水面付近でかき回して波を起こしても水圧センサに繋がる給湯口付近では水圧変化が伝わりにくいためと考えられる。これより、水面付近で起こる波をイベントとして用いる際は、入浴時と非入浴時で大きさの違いを考慮する必要があると言える。一方、水面付近で波を起こさなくとも水中で手や足などを動かした場合にも給湯機内部では水圧変化が起こり、出力信号として計測される。この場合は図 5.5 で表されるような規則的な波ではない。その場合は別途水中での動作として処理する必要がある。

以上、これらのイベントを対象に、インタラクティブなサウンドとして入浴状態を提示できるシステムを試作した。5.4 節ではその試作システムについて述べる。

## 5.4 システムの試作

### 5.4.1 システム構成

試作システムのハードウェア構成概要図を図 5.6 に示す。浴槽の給湯口に接続された導管が浴室外の給湯暖房機へ接続されており、そこで水圧センサが設置されている。この水圧センサから出力を取り出し、そのアナログ信号をパソコン (PowerBookG3/500) 上で A/D 変換して前述の換算を行って水位データに変換する。A/D 変換には National Instruments 社製 DAQCard500 (PCMCIA A/D 変換カード) を用いた。また、PC 上での信号計測、サウンドの発音制御のソフトウェアについては Max/MSP を用いてプログラミングを行った。

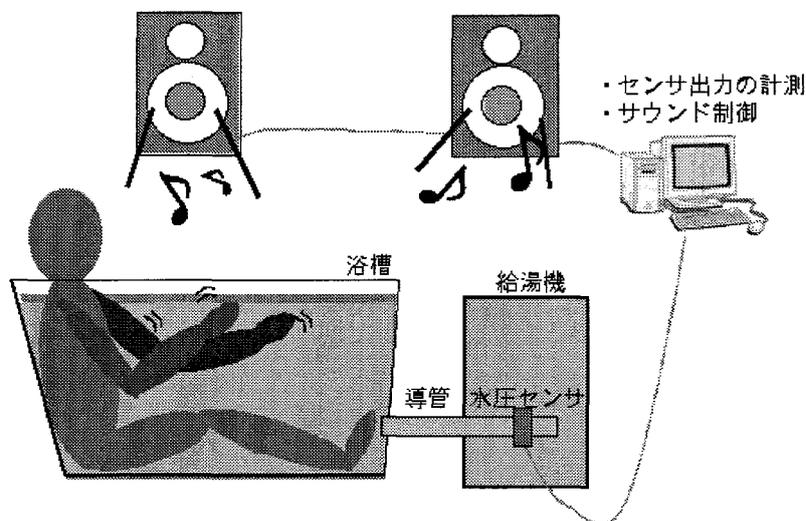


図 5.6 試作システム概要図

## 5.4.2 水位データの処理と抽出する制御信号

サウンドに結びつける制御信号は、5.3.3 節で述べたイベントの計測結果から、非入浴時の水面の揺れ、入水時、出水時、入浴中の水中の動作による水面の揺れ、を利用することにした。そして、制御信号は次のものに挙げるものを抽出することとした。

- 入浴状態 : 入浴中か否かの2値変数
- 振幅値 : 水位の変動や波による振幅値の変数
- 振幅トリガ : 閾値以上の振幅を検出した場合のトリガ信号

試作システムにおけるこれらの制御信号抽出処理を図5.7に示す。ノイズ除去後、水位換算された値を元に処理を行っている。左側の経路では入浴中かどうかの判定を行い2値変数を出力する。この判定では非入浴時の平均水位を基準水位とした。基準水位よりある値だけ高い水位を閾値とし、それより高い水位の状態が一定時間続いた場合に入浴状態と判定する。逆に一定時間閾値より低い場合は非入浴状態とする。この水位の閾値は基準水位よりも経験上20mm高い値とし、判断する一定時間も800msecとした。図5.7の右側の経路での振幅値の計算は約1500msec時間窓内の水位の最大値と最小値の差として随時求める。振幅トリガの検出では振幅値を800msec時間窓で最大値を求め、それがトリガ検出用閾値以上で、かつ入浴時の場合にのみトリガ信号を出力する。このトリガ検出用閾値は自由に変更できる。

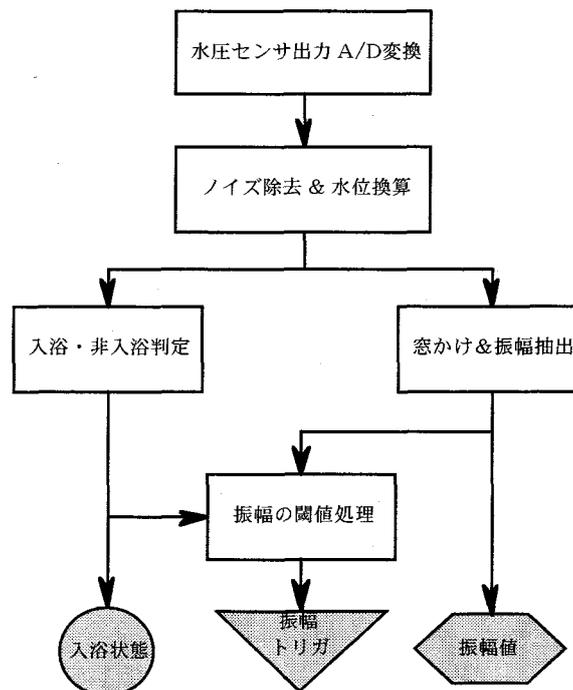


図 5.7 水位データ処理のフローチャートと得られる制御信号

### 5.4.3 サウンドデザイン

試作システムのサウンドデザインと前節で述べた制御信号による発音制御について述べる。この作業については、サウンドの選定やその変化方法の決定、Max/MSP のプログラミングまで、すべてをサウンドデザイナーとの共同作業で行った。用いたサウンドは4種類で、環境音楽的要素を持たせるというコンセプトのもとで制作した。まず南国の海というイメージから「海辺の波打ち音」と「貝殻音」を選定した。入浴は主に夜に行われることから、月をイメージさせるような「シンセサイザ音」も導入した。また、他のサウンドのイメージを壊さず音楽的要素を持たせる目的で「ピアノ音」も利用する。シンセサイザ音とピアノ音は音楽フレーズとして発音させる。これらのサウンドと制御信号による発音方法の関係を表 5.1 にまとめる。

表 5.1 サウンドとその制御

	波打ち音	貝殻音	シンセサイザ音	ピアノ音
サウンドの再生形態	サウンドファイル(AIFF)をループ再生	入浴動作時用, 出浴動作時用それぞれのサウンドファイル(AIFF)を通常再生	サウンドファイル(AIFF)を簡易サンプラーとして利用 MIDIファイルのデータにより再生	サウンドファイル(AIFF)を通常再生
音楽的要素	特になし	特になし	作曲された多数のメロディ 調性の統一感あり	作曲された多数のピアノフレーズ 調性の統一感あり
発音時の条件	常時	入浴動作時のみ	入浴中のみ	入浴中のみ
発音制御	振幅値により音量が変化ただし、非入浴時のほうがより大きく変化する	入浴状態の2値変数の変化により発音	基調となる低音シーケンスは繰り返し 振幅トリガにより中高音メロディのテンポとメロディの発現確率が変化	振幅トリガにより、サウンドファイルの再生位置とタイミングを設定

波打ち音は基本サウンドとして常に鳴り続けており、湯水を大きくかき回せば波の音も大きくなるよう、振幅値に合わせた音量制御を行う。但し、前述の通り、入浴時と非入浴時では同じように大きくかき回した場合の振幅値が異なるため、入浴時のほうがより小さな振幅で音量が大きくなるように制御している。

貝殻音は入出水動作により入浴状態の2値変数が変化した場合のみサウンドが鳴る。どちらの動作時も同様の音だが、出浴時のほうが長いサウンドサンプルとした。これにより入水動作と出水動作が貝殻音の鳴っている長さで区別できるようになっている。

シンセサイザ音は、基調となる低音シーケンスが繰り返され、多数用意された中高音の音楽フレーズがランダムに選択され付加される。この中高音のフレーズは振幅トリガによりテンポや発現確率が変化するようになっている。ピアノ音についても、シンセサイザ音と同様に音楽フレーズを多数用意しており、振幅トリガにより鳴らすフレーズの

選択やタイミングを制御する。但し一つのフレーズが鳴っている間は振幅トリガが検出されても発音しない。これら振幅トリガによる制御により、出力されるサウンドに音楽的要素の増加と共にインタラクティブなサウンド変化を実現した。

以上のサウンドとその発音制御を、前節の制御信号の抽出処理と共に Max/MSP で実装し、実際の浴槽と給湯機に接続することでシステムを構築した。

## 5.5 評価と考察

システムの評価として、被験者実験を行った。実験は2種類行い、一つはインタラクティブサウンド風呂としての評価、もう一つは浴室外からの入浴状態把握である。被験者数は13人(20~35歳の男性)である。入浴条件は、浴室温度が28℃、給湯温度40℃(浴槽内では実質38℃)に設定した。

### 5.5.1 入浴中のサウンドに対する被験者の意見

実験の一つめとして、試作システムを設置した浴槽でインタラクティブサウンド風呂を被験者に体験してもらった。その後、浴室環境や個々のサウンドに対してアンケートに回答してもらった。ここでは、7段階評価で「楽しめる」(1:楽しめない-7:楽しめる)、「落ち着く」(1:落ち着かない-7:落ち着く)、「癒される」(1:癒されない-7:癒される)、「飽きる」(1:飽きる-7:飽きない)の4項目について回答してもらった。この評価は用いたサウンドに依るが、サウンドデザインとしての今後の課題を明らかにするため評価を行った。回答で得られた点数の平均と標準偏差を図5.8に示す。

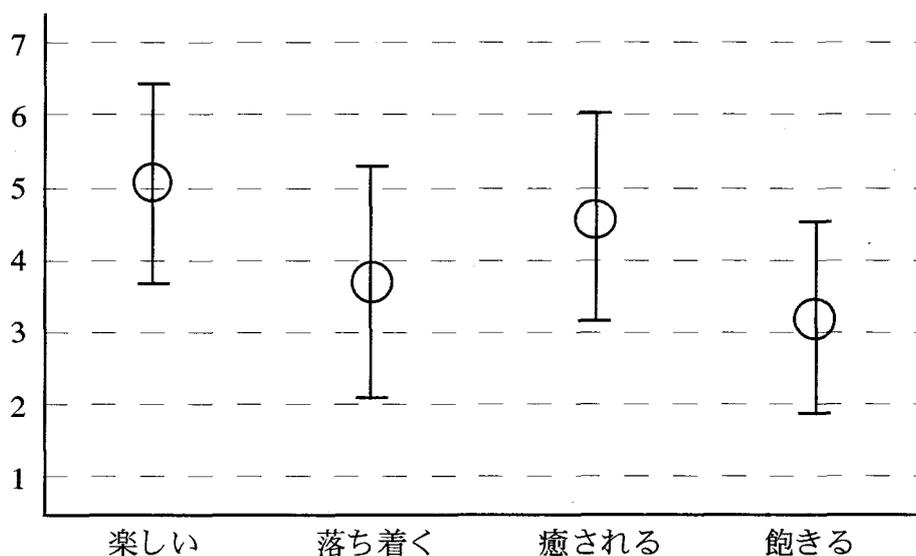


図 5.8 各質問に対する被験者の回答集計結果

図 5.8 より「楽しめる」と「癒される」については比較的好評を得ている。楽しめる点についてはインタラクティブな点についてのコメントが多く、システムの目的として当初期待していた通りの被験者の評価が得られた。「落ち着く」の評価については少し落ち着かない結果となった。これは波打ち音が他の音に比べ少し音量が大きかったことが原因であることが、被験者の感想からわかった。この結果はサウンドを作り込む際の調整が微妙で難しいことを表している。「飽きる」については何回も入浴すると変化のパターンがわかるという意見や、鳴るサウンドの種類が少ない、という意見に関係していた。また具体的に、このようなサウンドが欲しい、という要望も見受けられ、日常使うものとして個人の嗜好も大きく関係する事が確認できた。今後、日常で使うシステムとして実際に導入するためには、より多くのイベントに反応して複雑なサウンド変化が行えるほか、サウンドの種類を追加・変更できる機能を持つシステムとして改良していく必要がある。

### 5.5.2 浴室外からの入浴状態の把握について

二つ目の実験として、サウンドを聴くことで入浴状態がどの程度把握できるか被験者に判断してもらった。手順としては、まず 5.5.1 節でのサウンド風呂の体験時に意図的に入出水や安静・動作を行い、サウンドの種類と変化を覚えてもらった。そして、別の人が入浴する際に出力されるサウンドのみを浴室外で聴き、入浴状態の把握について回答する、という手順とした。回答の集計結果を表 2 に示す。これにより、入出水動作については全員把握できていることがわかる。安静時と動作時の区別ができなかった被験者もいたが、半数以上がわかるという結果であった。区別ができなかった理由は、安静時でも少ない生起確率によりシンセサイザ音がある程度鳴っていたためと考えられる。しかし結果を総合すると、制作意図通りサウンドによる入浴状態の把握はほぼ行えている。これは用いるサウンドのデザインに依るところが大きいだが、情報提示インタフェースとしての目的は達成している。

表 5.2 被験者による入浴状態把握結果

	わかる	わからない	割合 (%)
入浴時	13	0	100
動作あり	8	5	61.5
動作なし	10	3	76.9
出浴時	13	0	100

## 5.6 第5章まとめ

本章は、入浴者の状態をインタラクティブなサウンドとして表現することで、入浴者がそのサウンドで楽しめると同時に、浴室外の人に入浴状態を知らせることができるシステムについて述べた。この研究は浴室に適切なサウンドを求めたり入浴事故を自動検出するための研究ではないが、インタラクティブなサウンドによって、アメニティ空間を提供するものとして行った。また、浴室外からは入浴状態を直感的、感覚的に把握するための情報提示インタフェースの研究としても位置付け、2つの目的を両立した研究である。

システムとしては浴槽内の入浴者の動作や状態を湯水の動きとして計測し、その変化情報を抽出してリアルタイムでサウンド制御に用いている。入浴状態の計測には全自動風呂システムの湯張り機能のために備わっている水圧センサを利用した。これにより、水場での電氣的な安全を保障すると共にに既存設備の有効活用が行えた。試作システムでのサウンドには環境音楽的要素を含んだサウンドを用意した。このシステムで被験者実験も行った結果、多くの入浴被験者の感想から楽しめるといふ好評な結果が得られた。また、浴室外からの入浴状態把握の実験についても、ほとんどの被験者がサウンドで入浴状態の把握ができるという結果が得られた。これにより、情報提示インタフェースの目的は達していることを確認した。

このシステムの今後の課題としては、ユーザがサウンドを自由に追加・変更できるようにするほか、サウンドを変化させる要素を増やすなど、より楽しめるシステムとして発展させることが挙げられる。また試作システムではパソコンを使用した形態であるが、全自動風呂システム内部にこの機能を組み込むほか、ネットワーク越しの情報家電と機能連携するシステムとしても発展させていく必要がある。

## 第6章 結論

本研究は、自然かつ感覚的なヒューマン・コンピュータ・インタラクションを実現するインタラクティブシステムについて行ったものである。ここでは、インタラクションの研究としてあまり採り上げられることが少ない聴覚メディアに注目し、その中でも特に音楽メディアを採り上げることとした。そして、技術シーズの提供に留まらず、実際のニーズに基づいた実践的、実用的な音楽インタラクティブシステムの研究を行った。この研究について、本論文では3つのシステムについて論じてきた。

第1章ではヒューマン・コンピュータ・インタラクションの研究分野について、その研究課題の歴史的背景を述べた。また、特に映像や音響、センシング技術に関係するインタラクティブシステム研究について、本研究の位置付けを行い、その目的を述べた。

第2章ではインタラクションのスタイルについて述べ、音楽を対象とする場合のインタラクションの特徴や目的についてまとめた。そして、音楽インタラクティブシステムの構築に用いられる要素技術について、インタラクションの3つの部分（入力インタフェース、応答処理、出力インタフェース）に分け、各々の利用例も挙げてまとめた。また、これらの技術を組み合わせて構築されたシステムの研究事例や産業分野での応用例についても主要なものをまとめた。

第3章から第5章では、本研究で行った3つの音楽インタラクティブシステムの研究について各章で採り上げ、その各々の音楽的要素や目的、そこで使われた要素技術、インタラクションによって得られた効果や知見などについて述べた。

第3章は1つめの研究として、音楽的能力向上を支援するインタラクティブシステムについて述べた。具体的には歌唱の音痴な人を対象とした治療支援システムを採り上げた。このシステムは、現在、音痴治療の現場で実際に利用されている。研究では、まず従来の治療で用いられていたピッチマッチ訓練の手法を音痴のタイプ毎に音楽的能力の観点から見直した。そして各タイプに必要な訓練を選択的に行えるようシステムを構築した。ここでは、安定したピッチセンシング機能をソフトウェアで実現している。インタラクションの形態としては、システムへの入力は歌声、出力はグラフィクスであり、それらによるフィードバックループを形成する。実際の治療現場での実験の結果、インタラクティブなピッチマッチ訓練の効果により、治療にかかる期間が従来の訓練よりも大幅に短くできることが確認された。時間的な流れが重要となる音楽メディアでは、リアルタイム性の高いインタラクションが能力向上に有効であることを示した研究である。

第4章では、インタラクティブアートプロジェクト：「竹管の宇宙」を採り上げ、インタラクティブアート創作システムの研究について述べた。この研究はプロの尺八奏との共同研究で行われ、新しい音楽表現を行うためのプロジェクトである。ここでは、まず音楽インタラクティブシステムの要素技術の開発と、それによって創作された作品について述べた。研究開発の内容としては、ハードウェア環境である新世代楽器 Cyber 尺八やそのベースとなった汎用デジタイザ ATOM8 について説明した。Cyber 尺八は

従来の尺八の演奏技法をそのまま使うことができるプロ向けの楽器であり、センシング技術によって尺八演奏に重要な首振りなどの演奏ジェスチャがセンシングできる。ソフトウェア環境としては、ストーリー性のある作品を作る上で、効率的な創作活動ができるようなシーン記述ツールキット HIAT を開発し、それを用いた制作手法も制定した。そして、これらの制作環境をベースにインタラクティブなコンピュータ音楽作品の制作を行い、実際にコンサート公演を何度も行った。

さらに、このインタラクティブアート創作システムの研究では、演奏における奏者の緊張感、つまりインタラクションを行っている最中の生理的緊張状態に関する実験も行った。ここでは、無線携帯型の生体信号計測システムを開発し、実際のコンサートで奏者の緊張感の計測を行った。その結果、練習やコンサート当日のリハーサル、本番での演奏、と場面毎の緊張感の違いなどの傾向が得られた。これらの結果からは、生理的緊張状態がプロの演奏家として必要な能力を計るの指針として利用できることが示唆された。

これら第4章の研究により、開発したシステムが新しい音楽表現を可能にしたこと、かつその作品制作が効率的に行えることを確認した。また、生理的インタフェースによる新しいインタラクティブシステムの可能性を示唆した研究でもある。

第5章では、アメニティ浴室空間を提供するという産業ニーズに基づいて行った、インタラクティブサウンド風呂システムの研究について述べた。このシステムは、浴槽を楽器と見立て、湯水の動きをセンシングしてサウンドに変換するシステムである。また、家庭に既存の設備を利用して構築されるため、導入コストも低いという実用的な利点もある。システム動作としては、湯水に伝わるユーザの動きがサウンドとしてフィードバックされることでインタラクションが形成される。ユーザは楽しんで入浴できることが被験者実験で確認し、アメニティ浴室空間の一例として有効であることを示した。また、このサウンドを音響ディスプレイシステムとして利用することで、浴室外にいる人がそのサウンドを聴くことで入浴状態を恒常的に把握することが可能であることも被験者実験で確認した。これにより、アメニティだけでなく安全管理にも応用可能なシステムであることを示した。実用的な音楽インタラクティブシステムの研究である。

本論文では、以上の3つの研究により、従来の音楽制作活動だけに限らない、様々な場面で音楽インタラクティブシステムが有効かつ効果的であることを示してきた。これらの音楽インタラクティブシステムの研究事例で共通するのは、自然なインタラクションを行うため様々なセンシング技術を利用したということである。そして、それらの効果を確認したと共にいくつかの新しい知見も得た。

システムの実装に関しては、どのシステムもビジュアルプログラミング環境 Max を用いた。これにより、入出力インタフェース部の処理を特に意識せず、音楽アプリケーションならではの時間連続性およびリアルタイム性の高い処理が容易にプロトタイピングでき、システムの構築、実行も行えた。また、本研究では音楽家やサウンドデザイナーが研究に参加して共同作業を実践した。音楽をはじめとする感性的メディアを対象としたシステムを開発する場合、音楽家やデザイナーとの共同作業が多くなる。そこではC言語などでプログラミングできない人でも感性的な処理や動作を扱える環境が重要とな

る。ビジュアルプログラミング環境はそのような用途として向いている。その環境で機能装備されていないもしくは不可能な処理については、技術者がC言語でプラグインを開発することで機能拡充が図れる。本研究ではビジュアルプログラミング環境が共同作業のツールとして効率よいことも確認したことになる。今後、このような環境を利用して複雑なシステムや処理を抽象化し、容易に扱えるようにすることがますます重要になってくると考えられる。

音楽インタラクティブシステムの今後の展望と課題についてまとめる。

ユーザが特に違和感を感じずに利用できる音楽インタラクティブシステムの実現には、入力インタフェース、応答処理、出力インタフェースのどれもが重要な要素である。入力インタフェースとしてセンシング技術を利用するものについては、今後のナノ技術の発展に期待がかかる。より小型のセンサ素子が開発され、コンピュータの高速化と共にセンシング技術も向上することとなる。それらを利用することにより、Cyber 尺八のような新世代楽器の研究や指揮システムにおけるジェスチャの計測では、無拘束・無意識な計測機器の導入が可能になると言える。

応答処理については、音痴治療支援システムのように、基本的な音楽的能力の訓練であれば、特に高次の感性情報処理が必要ない場合もある。しかし、一般的には音楽をアプリケーションとした場合、知識情報処理、感性情報処理に加え、生理指標をベースとした生理情報処理、さらに感情をも含めた複合的な人間の応答モデルの構築が今後必要と考えられている。生理情報処理の研究は、そのベースとなる生理指標の計測と解析が重要である。これについては、最近のセンサの小型化や高度化でこれまで計測できなかった場所や場面で実験が行えるようになってきている。入力インタフェースにおける生理的インタフェースの実現にもつながる話であり、生理情報処理の分野は今後注目すべき領域である。

出力インタフェースに関しては、音響出力に限って言う場合、機器については三次元音響出力技術や、音響合成技術の更なる高度化が望まれる。機器の課題がある一方で、出力コンテンツのデザインに関する課題も存在する。ここではサウンドデザイナーが欲しい楽音やサウンドを即座に選別・設定できる仕組みが必要である。CGや画像などのビジュアルコンテンツに関しては、イメージ通りの画像や動画を検索・選択するシステムや手法の研究が多数行われ、また実用化されているが、ことサウンドに関してはこういった研究が少ない。本研究における出力サウンドのデザインについては、相当の時間を費やしている。今後、サウンドに関しても、このようなデザイン支援技術の開発や実用化が望まれる。

以上、本研究では聴覚メディアの中で特に音楽メディアを中心とした実践的・実用的なインタラクティブシステムの研究を行ってきた。これらの研究成果が他の音楽関連研究に対して実用的なアプリケーションを開発する際の参考になることを望む。同時に、音楽以外の分野での一般的なインタラクションへ応用する際にも参考になれば幸いである。



## 【参考文献】

- [Boie 1989] Boie, B., Mathews, M. and Schloss, A.: The Radio Drum As A Synthesizer Controller, Proc. ICMC1989, pp.42-45 (1989)
- [Boucsein 1992] Boucsein, W.: Electrodermal Activity, Plenum Press (1992)
- [Chadabe 1983] Chadabe, L.: Interactive Composing, Proc. ICMC1983, pp.298-306 (1983)
- [Dahley 1998] Dahley, A., Wisneski, C. and Ishii, H., Water Lamp and Pinwheels: Ambient Projection of Digital Information into Architectural Space; Proc. CHI'98, pp.269-270 (1998)
- [Fels 1999] Fels, S. and Mase, K., : Iamascope: A Graphical Musical Instrument, Computers & Graphics, Vol. 23, No. 2, pp. 277-286 (1999)
- [Geringer 1983] Geringer, J. : The relationship of pitch matching and pitch discrimination abilities of preschool and forth-grade students, J. Research in Music Education, 31, pp.93-139 (1983)
- [Gould 1969] Gould, G.A. : Developing specialized programs for singing in the elementary school, Bulletin of the Council for Research in Music Education. 17, pp.9-22 (1969)
- [Hirai 1998] Hirai, S., Katayose, H., Kanamori, T. and Inokuchi, S.: Software Sensors for Interactive Digital Art, Proc. ICMC1998, pp.514-517 (1998)
- [Howard 1987] Howard, D.M. and Welch, G.F.: A new microcomputer system for the assesment and development of singing ability. Inst. of Acoustics Conf. on New Developments in Instrumentation and Computing in Acoustics (1987)
- [Ishii 2001] Ishii, H., Ren, S. and Frei, P., Pinwheels: Visualizing Information Flow in an Architectural Space; The proceedings of CHI'01, pp.111-112 (2001)
- [Jones 1979] Jones, M. : Using the vertical-keyboard instruments with the uncertain singers, J. Research in Music Education, 27, pp.173-184 (1979)
- [Katayose 1997] Katayose, H., Shirakabe, H., Kanamori, T. and Inokuchi, S.: A Toolkit for Interactive Digital Art, Proc. ICMC1997, pp.476-478 (1997)
- [Katayose 1998] Katayose, H., Hirai, S. and Inokuchi, S.: Physiological Measurement of Performer's Tension and its Utilization for Media Control, Proc. ICMC1998, pp.211-214 (1998)

- [Katayose 1999] Katayose, H., Hirai, S., Kanamori, T. and Inokuchi, S.: A Study of Interactive Art -Environment and Physiological Measurement-, Proc. VSMM'99, pp.107-115 (1999)
- [Leider 1997] Leider, C.N.: A Realtime MIDI Library for an Inexpensive General-Purpose Microcontroller-Based Interactive Performance System. Proc. ICMC1997, pp.482-484 (1997)
- [Mulder 1995] Mulder, A.: The I-Cube System:moving towards sensor technology for artists,  
<http://fas.sfu.ca/cs/people/ResearchStaff/amulder/personal/infusion/ISEA95.html> (1995)
- [Nishijima 1992] Nishijima, M. and Watanabe, K.: Interactive music composer based on neural networks, Proc. ICMC1992, pp.53-56 (1992)
- [Noll 1967] Noll, A.M.: Cepstrum pitch determination, J. Acoust. Soc. Am., Vol.41, No.2, pp.293-309, Feb. (1967)
- [Paradiso 1997] Paradiso., J.A. and Gershenfeld, N.: Musical Applications of Electric Field Sensing. Computer Music Journal, 21:2, pp.69-89 (1997)
- [Paradiso 1999] Paradiso, J., Hsiao, K. and Hu, E.: Interactive Music for Instrumented Dancing Shoes, Proc. ICMC1999, pp.453-456 (1999)
- [Porter 1977] Porter, Y. : The effects of multiple discrimination training on pitch matching behavior uncertain singers, J. Research in Music Education, 25, pp.68-81 (1977)
- [Roads 1996] Curtis Roads: The Computer Music Tutorial, The MIT Press (1996)
- [Roberts 1975] Roberts, E. and Davis, A. : Poor pitch singing: Response monotone singers to a program of remedial training, J. Research in Music Education, 23, pp.227-237 (1975)
- [Romaine 1961] Romaine, W.B. : Developing singers from nonsingers, Unpublished doctoral dissertation, Teachers College, Columbia University New York (1961)
- [Rowe 1993] Robert Rowe: Interactive Music Systems Machine Listening and Composing, The MIT Press (1993)
- [Rubine 1988] D.Rubine and P.McAvinney: The VideoHarp, Proc. ICMC1988, pp.49-55 (1988)
- [SANYO 2001] 浴室内カメラで安否確認するシステム,<http://www.sanyo.co.jp/koho/hypertext4/0106news-j/0605-1.html>
- [Senju 1987] Senju,M. and Ohgushi,K.: How are the players ideas conveyed to audience?. Music Perception, 4, pp.311-323 (1987)

- [Simura 1993] Simura,S., Tukitani,T., Seyama,T. and Yamaguti,O.: Simplicity as complexity - technicalities and aesthetics of Japanese musical instruments and music, Proc. ICMC1993, pp.10-17 (1993)
- [Stauffer 1986] Stauffer, S.L. : An investigation of the effects of melodic and harmonic context on the development of singing ability in primary grade children, Dissertation Abstracts International, 46, pp.1863 A (1986)
- [Yarbrough 1992] Yarbrough, C., Browers, J. & Benson, W. : The effects of vibrato on the pitch matching accuracy of certain and uncertain singers, J. Research in Music Education, 40, pp.30-38 (1992)
- [青野 1999] 青野裕司, 片寄晴弘, 井口征士: アコースティック楽器を用いたセッションシステムの開発, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-D-II, No.11, pp.1847-1856 (1999)
- [安西 2000] 安西祐一郎, 草原真知子, 片寄晴弘, 笹田, 中津良平, 黒川隆夫: パフォーマンスのためのマルチメディア情報利用, マルチメディア情報学<10> 自己の表現, pp.67-113, 岩波書店 (2000)
- [石井 1994] 石井裕: CSCW とグループウェア, オーム社 (1994)
- [石井 1998] 石井裕: Tangible Bits:情報の感触/情報の気配; 情報処理学会学会誌, Vol.39-8, pp.745-751 (1998)
- [石川 2000] 石川修, 平井重行, 金森務, 片寄晴弘, 井口征士: ジェスチャーによる楽器 Play the D.E., インタラクション 2000 論文集, pp.161-162 (2000)
- [井口 1994] 井口征士: 感性情報処理, オーム社 (1994)
- [江原 1997] 江原, 野口, 石原: 言語障害者用新発声発語訓練システムの開発, システム制御情報学会誌 第 41 巻 第 11 号, pp.453-458 (1997)
- [大照 1994] 大照完, 橋本周司: 仮想音楽空間, オーム社 (1994)
- [片寄 1998] 片寄晴弘: 特集ビジュアル言語 MAX, bit, Vol.30 No.1, pp.46-49, Jan. (1998)
- [片寄 1995] 片寄晴弘, 金森 務, 平井重行, 村尾忠廣, 井口征士: MAX を利用した Voice Shooting Game, 情報処理学会研究報告, 95-MUS-11 (1995)
- [片寄 1996] 片寄晴弘, 竹内好宏, 上符裕一, 井口征士: TFP の改良と教育利用における評価, 情報処理学会研究報告, 96-MUS-16, pp.21-25 (1996)
- [片寄 1997] 片寄晴弘, 平井重行, 村尾忠廣, 金森務, 井口征士: 歌唱トレーニングシステム VSG の改良, 情報処理学会インタラクション'97 論文集, pp.143-147, March. (1997)
- [金森 1995] 金森務, 片寄晴弘, 新美康永, 平井宏, 井口征士: ジャズセッションシステムのための音楽認識処理の一実現法, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.1, pp.139-152 (1995)

- [金森 1997] 金森務, 片寄晴弘, 志村哲, 井口征士: Cyber 尺八の開発, 計測自動制御学会論文誌, Vol.33, No.8, pp.735-742 (1997)
- [金森 1999] 金森務, 片寄晴弘, 平井重行, 古川久生, 井口征士: 緊張感の伝播計測を目的とした多重無線化生体信号センサ, インタラクシオン'99 論文集, pp.53-54 (1999)
- [河原 1997] 河原英紀, Alain de Cheveigne: 原理的に抽出誤りの存在しないピッチ抽出法とその評価について, 電子情報通信学会技術研究報告 SP96-96, pp.9-18 (1997)
- [後藤 1999a] 後藤 真孝, 根山 亮, 村岡 洋一: RMCP: 遠隔音楽制御用プロトコルを中心とした音楽情報処理, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.3, pp.1335-1345 (1999)
- [後藤 1999b] 後藤 真孝, 日高 伊佐夫, 松本 英明, 黒田 洋介, 村岡 洋一: "仮想ジャズセッションシステム: VirJa Session", 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.4, pp.1910-1921 (1999)
- [國枝 1997] 國枝伸行, 島村徹也, 鈴木誠史: 対数スペクトルの自己相関関数を利用したピッチ抽出法, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J80-A, No.3, pp.435-443, March. (1997)
- [黒川 1994] 黒川隆夫: ノンバーバルインタフェース, オーム社 (1994)
- [小谷 1998] 小谷亮: エージェントとユーザの共同演奏システム, 情報処理学会論文集 (1998)
- [佐近田 1998] 佐近田展康: WaterMachine,  
<http://www.bekkoame.ne.jp/~nsakonda/nsprof/wm.html>
- [澤田 1996] 澤田秀之, 橋本周司: 加速度センサを用いたジェスチャー認識と音楽制御への応用, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-A, No.2, pp.452-459 (1996)
- [志村 1988] 志村哲: 音の息吹き -尺八奏法の生成と変化-, 藤井知昭, 山口修, 月溪恒子 (編), 「楽の器」, pp.138-148, 弘文堂 (1988)
- [志村 1998] 志村哲: Cyber 尺八と《竹管の宇宙》-コンピュータによる虚無僧尺八の現代化-, コンピュータと音楽の世界, pp.463-469, 共立出版 (1998)
- [高木 1998] 高木, 塚田, 川原田, 佐々木, 石島, 田村, 戸川, 山越: ウェルフェアテクノハウスにおける健康自動計測システムを利用した長期測定; 第13回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.497-500 (1998)
- [田村 1998] 田村博: ヒューマンインタフェース, オーム社 (1998)
- [都木 1997] 都木徹, 清山信正, 宮坂栄一: 複数の窓幅から得られた自己相関関数を用いる音声基本周期抽出法, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J80-A, No.9, pp.1341-1350, Sep. (1997)

- [蔦田 1997] 蔦田広幸, 加藤博一, 木村朝子, 片寄晴弘, 金森務, 井口征士: インタラクティブアートにおける演奏家と観客の緊張状態の生理的解析, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol.2, No.2, pp.9-16 (1997)
- [寺田 2001] 寺田努, 塚本昌彦, 西尾章治郎: DoublePad/Bass: 2つのPDAを用いた携帯楽器, 情報処理学会研究報告, 2001-MUS-41, Vol.2001, No.82, pp.77-82 (2001)
- [長嶋 1998] 長嶋洋一, 橋本周司, 平賀譲, 平田圭二: コンピュータと音楽の世界, 共立出版 (1998)
- [ニューマン 1999] ウィリアム M.ニューマン, マイケル G. ラミング: インタラクティブシステムデザイン, ピアソン (1999)
- [橋本 2001] 橋本和彦: 住宅におけるリアルタイム人間行動計測技術; 計測自動制御学会第7回福祉工学研究委員会研究会資料, pp.9-12 (2001)
- [平井 1998] 平井重行, 金森務, 片寄晴弘, 井口征士: インタラクティブアートのためのソフトウェアセンサ, 情報処理学会研究報告, 98-MUS-26, pp.61-66 (1998)
- [平井 2000] 平井重行, 金森務, 片寄晴弘, 佐藤宏介: インタラクティブアートにおける自律神経系生理指標計測, 電子情報通信学会基礎・境界講演論文集, pp.454-455 (2000)
- [平井 2001] 平井重行, 藤井元, 井口征士: 給湯器の水圧センサを利用した入浴中の呼吸計測; 計測自動制御学会論文集 (投稿中) (2001)
- [広瀬 1995] 広瀬通孝: バーチャルリアリティ, オーム社 (1995)
- [藤澤 1998] 藤澤, 柿木, 山崎: 新生理心理学 (1-3 巻), 北大路書房 (1998)
- [前川 2001] 前川督雄, 西本一志, 多田幸生, 間瀬健二, 中津良平, ネットワーク型ウェアラブル音楽創奏システムと日常生活空間演出構想の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.6, No.2, pp.69-78 (2001)
- [間瀬 1998] 間瀬健二, クラウディオ S. ピンヤネス, アーロン F. ボビック: インタラクティブシステム設計のための時区間表現による スクリプト記述法, 情報処理学会論文誌, Vol. 39, No.5, pp.1403-1413 (1998)
- [村尾 1995] 村尾忠廣: 「調子外れ」を治す, 音楽之友社 (1995)
- [村尾 1992] 第14回国際音楽教育リサーチセミナー及び歌唱障害児 (音痴) に関する国際シンポジウム委員会編資料集 (1992)
- [弓場 1998] 弓場徹: 歌う筋肉, ビクターエンターテイメント (1998)
- [米沢 1988] 米沢義道, 伊藤一典, 平野圭蔵: 音痴の音高感覚に関する検討, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J71-A, No.8, pp.1532-1538, Aug. (1988)
- [米澤 2000] 米澤朋子, 間瀬健二: 流体による楽器インタラククション; 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol.5, No.1, pp.755-762 (2000)
- [和氣 1994] 和氣早苗, 加藤博一, 才脇直樹, 井口征士: テンション・パラメータを用いた協調型演奏システム-JASPTER-, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.7, pp.1469-1481 (1994)

[和辻 2001] 和辻徹: 家電機器を用いた行動・生体情報モニタリング; 計測自動制御学会第7回福祉工学研究委員会研究会資料, pp.13-17 (2001)

## 【謝辞】

本論文は、著者が財団法人イメージ情報科学研究所 (LIST), 大阪大学大学院, 株式会社関西新技術研究所 (KRI) にてこれまで行った研究を, 井口征士教授のご指導のもとでまとめたものです。井口征士教授からは, このような研究を行う機会を与えて下さり, LIST では研究グループリーダーとして, また大阪大学大学院でも直接の指導教官として常日頃よりご指導ご鞭撻を賜りました。心より感謝の意を表します。

谷内田正彦教授, 西田正吾教授にも本論文をまとめる際に貴重なご意見を頂戴すると共に, 有益な議論をさせて頂きました。厚くお礼申し上げます。

和歌山大学片寄晴弘助教授には, 筆者が京都工芸繊維大学学生だった時代からご指導頂き, また LIST 在籍時から現在に至るまで音楽関連研究に対する多大なご指導を頂きました。深く感謝いたします。

ミュージシャン兼電子回路技術者である金森務氏は, 筆者が京都工芸繊維大学在籍時からの先輩として, LIST 在籍時以降は共同研究者として研究推進に様々なご協力を頂きました。心より感謝いたします。

KRI 宮阪信次常務取締役には, 筆者が LIST 研究員として出向してこのような研究を行う機会を与えて頂き, 大阪大学大学院入学についてもご理解を頂きました。心よりお礼申し上げます。また杉本一郎部長, 山本重夫研究員を始め, 研究に協力頂いた KRI 社員の方々にも感謝いたします。

愛知教育大学の村尾忠廣教授には, 音痴治療支援システムの研究を進めるにあたり, 調子外れに関する様々な議論や, システムを利用した治療データの収集に協力頂きました。心よりお礼申し上げます。

尺八奏者である大阪芸術大学の志村哲助教授, Cyber 尺八システムオペレータの池淵隆氏には, 「竹管の宇宙」プロジェクトの共同研究者として多大なご協力を頂きました。またこのプロジェクトでは, 映像制作で大阪芸術大学大橋勝先生にご協力頂いたほか, 生体信号計測システムの構築で大阪電気通信大学古川久男助教授, 株式会社ティーエスイंक竹綱氏, 有國氏にもご協力頂きました。生体計測に関しては, 三菱電機株式会社大須賀美恵子氏, 株式会社オムロンライフサイエンス研究所西尾恭幸氏に様々なご意見, ご指導を頂きました。「竹管の宇宙」プロジェクトに関わったすべての方々, 研究指導また議論して頂いた方々に深く感謝の意を表します。

インタラクティブサウンド風呂システムの研究では, 筆者のアイデアにご賛同頂き, 研究推進して頂いた大阪ガス株式会社開発研究部出馬弘明部長, リビング開発部の平山輝マネージャ, 共同研究者としてご協力頂いた藤井元氏に深く感謝いたします。またサウンドデザインを手掛けて頂いた音楽家佐近田展康氏のほか, 研究に協力頂いた尾崎光氏, 百瀬俊成氏, 道広和美氏, 城野尚子氏にも感謝いたします。

大阪大学大学院井口研究室の佐藤宏介助教授, 日浦慎作助手, 西躰朝子助手, 堀井千夏氏, 中澤篤志氏 (現東京大学生産技術研究所研究員) には研究内容に対する貴重なご意見を頂くと同時に, 大学の研究室生活でいろいろお世話になりました。また, 筆者が

LIST 在籍時にも青野裕司氏（現 NTT サイバーメディア研究所）や上田健太郎氏をはじめとする、井口研究室学生諸氏にもお世話になりました。そして、LIST で同じ研究グループ所属だった三菱電機株式会社坂口貴司氏、三輪祥太郎氏にも研究に関する様々な議論をさせて頂きました。井口研究室の皆さんおよび LIST 井口研究グループだった方々に深く感謝いたします。

京都工芸繊維大学工芸学部平井宏助教授には、筆者が同大学修士時代に担当教官としてご指導頂き、研究の厳しさ面白さを教えて頂きました。心よりお礼申し上げます。

そして、両親平井靖男、平井喜久子には、これまで筆者の研究活動に理解を示し、暖かく見守って頂きました。妹平井麻紀にも研究用コンテンツ制作などで陰ながら支えとなってもらいました。心より感謝します。

最後に、日頃より筆者の研究活動に理解を示し、研究内容に関する有益な助言のほか、本論文をまとめる際にも多大な協力をしてくれた妻早苗に、心から感謝の意を表します。

# 研究業績リスト

## 【学術論文】

1. 平井重行, 片寄晴弘, 井口征士: 歌の調子外れに対する治療支援システム, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J84-D-II, No.9, pp.1933-1941 (2001)
2. 平井重行, 志村哲, 金森務, 片寄晴弘: インタラクティブコンピュータミュージックの制作と作品の検討 - 「竹管の宇宙」を題材として-, 情報処理学会論文集 (採録決定)
3. Shigeyuki Hirai, Satoshi Shimura, Tsutomu Kanamori, Haruhiro Katayose and Seiji Inokuchi: Design, Development, Production and Discussion of Interactive Computer Music: on the subject of "Tikukan no Uchu", Journal of New Music Research (投稿中)
4. 平井重行, 藤井元, 佐近田展康, 井口征士: 入浴状態をモニタリングできるサウンド風呂, ヒューマンインタフェース学会論文誌 (投稿中)

## 【学術短論文】

1. 平井重行, 藤井元, 井口征士: 給湯器の水圧センサを利用した入浴中の呼吸活動の計測, 計測自動制御学会論文集 (投稿中)

## 【国際会議】

1. Shigeyuki Hirai, Haruhiro Katayose, Tsutomu Kanamori and Seiji Inokuchi: Software Sensors for Interactive Digital Art, Proceedings of ICMC1998, pp.514-517 (1998)
2. Haruhiro Katayose, Shigeyuki Hirai, Tsutomu Kanamori, Hirokazu Kato and Seiji Inokuchi: Physiological Measurement of Performer's Tension and its Utilization for Media Control, Proceedings of ICMC1998, pp.211-214 (1998)
3. Haruhiro Katayose, Shigeyuki Hirai, Tsutomu Kanamori and Seiji Inokuchi: A Study of Interactive Art -Environment and Physiological Measurement-, Proc.VSMM '99, pp.107-115 (1999)
4. Haruhiro Katayose, Shigeyuki Hirai, Chinatsu Horii, Asako Kimura and Kosuke Sato: Kansei Interaction in Art and Technology, Proceedings of HCI International 2001, pp.509-513 (2001)

## 【国内査読付きシンポジウム発表】

1. 片寄晴弘, 平井重行, 村尾忠廣, 金森務, 井口征士: 歌唱トレーニングシステム VSG の改良, インタラクシオン'97, pp.143-147 (1996)
2. 片寄晴弘, 金森務, 平井重行, 坂口貴司, 井口征士: 簡易モーションキャプチャセンサ DigitEye3D とインタラクティブシステムへの応用, インタラクシオン'98 論文集, pp.67-72 (1998)

## 【口頭発表】

1. 平井重行, 金森務, 平井宏: ジャズにおけるコードボイシングからの感性情報抽出, 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G424 (1993)
2. 平井重行, 金森務, 平井宏, 新美康永: ジャズの伴奏からの, 調整を含めた感性情報抽出, 情報処理学会研究報告, 94-MUS-8 (1994)
3. 片寄晴弘, 金森務, 平井重行, 村尾忠廣, 井口征士: MAX を利用した Voice Shooting Game, 情報処理学会研究報告, 95-MUS-11-7 (1995)
4. 平井重行, 片寄晴弘, 金森務, 坂口貴司, 井口征士: 音楽情報処理の最近の動向ーイメージ情報科学研究所における取り組みー, 平成9年電気関係学会関西支部連合大会, pp. (1997)
5. 平井重行, 金森務, 片寄晴弘, 井口征士: 携帯型生理信号センサの開発とその応用, 1998年電子情報通信学会総合大会講演論文集情報・システム講演論文集1, pp.105 (1998)
6. 平井重行, 片寄晴弘, 金森務, 井口征士: インタラクティブアートのためのソフトウェアセンサ, 情報処理学会研究報告, 98-MUS-26, pp.67-73 (1998)
7. 高柳剛, 青野裕司, 平井重行, 片寄晴弘, 井口征士: 音楽的自由度をコントロール変数としたセッションシステムの開発, 情報処理学会研究報告, 98-MUS-26, pp.45-52 (1998)
8. 片寄晴弘, 平井重行, 金森務, 高安マリ子, 井口征士: ダンスにおける意図伝達の物理的・心理的計測, 信学技報 HIP98-27, pp.39-46 (1998)
9. 金森務, 片寄晴弘, 平井重行, 古川久生, 井口征士: 緊張感の伝播計測を目的とした多重無線化生体信号センサ, インタラクシオン'99 論文集, pp.53-54 (1999)
10. 平井重行, 三輪祥太郎, 金森務, 片寄晴弘, 井口征士: 人間の動きのセンシングーDigitEye3D とジェスチャセンサー-, ヒューマンインタフェース学会研究報告集 Vol.1 No.1, pp.57-62 (1999)
11. 上田健太郎, 平井重行, 片寄晴弘, 井口征士: LIST/阪大アプリケーションの再構築ーインタラクティブシステム開発用 MIDI ライブラリの使用ー, 情報処理

学会研究報告 99-MUS-30, pp.13-18 (1999)

12. 高柳剛, 青野裕司, 平井重行, 片寄晴弘, 井口征士: 曲の崩れ度をパラメータとするセッションシステムの開発, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, (1999)
13. 石川修, 平井重行, 金森務, 片寄晴弘, 井口征士: ジェスチャーによる楽器 PlaytheDE, インタラクシオン 2000 論文集, pp.161-162 (2000)
14. 上田健太郎, 平井重行, 片寄晴弘, 井口征士: Two Finger Piano の改良, インタラクシオン 2000 論文集, pp.49-50 (2000)
15. 平井重行, 金森務, 片寄晴弘, 佐藤宏介: インタラクティブアートにおける自律神経系生理指標計測, 電子情報通信学会総合大会基礎・境界講演論文集, pp.454-455 (2000)
16. 平井重行, 橋本賢一郎, 別所弘章, 井口征士: 構音障害者向けリハビリテーションシステムの開発, 電子情報通信学会総合大会基礎・境界講演論文集, pp.222 (2000)
17. 橋本賢一郎, 平井重行, 井口征士: 構音障害音声の評価手法に関する一検討, 電子情報通信学会総合大会基礎・境界講演論文集, pp.468-469 (2000)
18. 橋本賢一郎, 平井重行, 井口征士: 構音障害の明瞭度評価法の提案, 平成 12 年度電気関西支部連合大会講演論文集, G407 (2000)
19. 津田学, 平井重行, 金森務, 片寄晴弘, 佐藤宏介: 多様な出力メディアを扱うインタラクティブシステム, 電子情報通信学会総合大会基礎・教会講演論文集, pp.348 (2000)
20. 新山王政和, 平井重行: 基本的なビートの取り方の違いによる動作の視覚的に異なった印象—マーチングバンド経験者と未経験者のステップを比較した場合—, 日本音楽教育学会 音楽教育学第 30-2 号附録, pp.32 (2000)

#### 【その他発表, 雑誌, セミナー資料等】

1. 片寄晴弘, 平井重行: 歌唱トレーニングシステム VSG, bit, Vol.30, No.2, pp.20-26 (1998)
2. 平井重行: 関西電力(株)主催「げんきエネルギー21 シニア・フェスタ」, TFP (Two Finger Piano) 及び VSG (Voice Shooting Game) 出展
3. 片寄晴弘, 平井重行, 金森務, 志村哲, 大橋勝, 池淵隆, 井口征士: 音・映像・所作の融合によるインタラクティブアート, ヒューマンメディアシンポジウム資料, (1998)
4. 平井重行: MAX のグラフィクス機能の拡張 -GEM の Macintosh への移植-, The Proceedings of DSP SUMMER SCHOOL 2000, pp.20-25 (2000)

5. 平井重行: GEM for Macintosh, DSP SUMMER SCHOOL 2000 (2000) (口頭発表)
6. 平井重行: 背中がゾクゾクとする感覚をはかる, インタラクティブメディアアート 2000@和歌山 資料, pp.5-7 (2000)
7. 平井重行: GEM for Macintosh のオブジェクト開発, The Proceedings of DSP SUMMER SCHOOL 2001, pp.19-25 (2001)
8. 平井重行: GEM for Macintosh (第2報), DSP SUMMER SCHOOL 2001 (2001) (口頭発表)
9. 平井重行, 藤井元, 百瀬敏成, 尾崎光, 佐近田展康: Max/MSP によるインタラクティブサウンド風呂システムの試作, DSP SUMMER SCHOOL 2001 (2001)
10. 平井重行: Max ケーススタディインタビュー, トランス Max エクスプレス, リットーミュージック, pp.911-913 (2001)