

床面提示型触覚エンタテイメントシステムの  
提案と開発  
(PDF版)

2004年3月提出 (2009年1月 PDF版公開)  
指導教官 佐藤 誠 教授

提出者 東京工業大学大学院  
総合理工学研究科  
知能システム科学専攻  
白井 暁彦

# 目 次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>6</b>
1.1 はじめに . . . . .	6
1.2 論文構成 . . . . .	7
1.3 「遊び」の科学的研究とその歴史 . . . . .	9
1.3.1 はじめに . . . . .	9
1.3.2 「遊び」の研究の源流 . . . . .	9
1.3.3 「遊び」の分類 . . . . .	11
1.3.4 言語的定義における問題 . . . . .	13
1.3.5 現代における「遊び」の研究 . . . . .	16
1.3.6 その他の「遊び」研究 . . . . .	18
1.3.7 まとめ：本研究における「遊び」の定義 . . . . .	19
1.4 バーチャルリアリティ . . . . .	22
1.4.1 基本概念と歴史 . . . . .	22
1.4.2 半導体技術の進歩による影響 . . . . .	23
1.4.3 リアルタイムシミュレーション技術 . . . . .	26
1.4.4 没入型映像提示技術 . . . . .	27
1.4.5 Human-Computer Interaction 技術 . . . . .	30
1.4.6 VR 技術の応用 . . . . .	31
1.5 エンタテイメントシステム . . . . .	34
1.5.1 基本概念 . . . . .	34
1.5.2 広義のエンタテイメントシステム . . . . .	36
1.5.3 狹義のエンタテイメントシステム . . . . .	37
1.5.4 コンピュータゲームシステム . . . . .	37
1.5.5 エンタテイメント VR システム . . . . .	39
1.5.6 過去に発表した関連システム . . . . .	40
1.5.7 アートとの境界 . . . . .	44

1.5.8 まとめ . . . . .	46
1.6 研究の目的 . . . . .	47
<b>第 2 章 床面提示型触覚エンタテイメントシステムの提案</b>	<b>48</b>
2.1 子供とエンタテイメントシステム . . . . .	48
2.1.1 幼稚園における観察 . . . . .	49
2.1.2 バーチャルバスケットボールにおける検討 . . . . .	49
2.2 重視する要素 . . . . .	50
2.2.1 その他の要素 . . . . .	53
2.3 床面提示型触覚エンタテイメントシステムの提案 . . . . .	55
2.3.1 床面への映像投影 . . . . .	55
2.3.2 触覚提示可能な直接的インターフェイス . . . . .	56
2.3.3 物理とキャラクタの運動シミュレータ . . . . .	58
2.3.4 提案システム外観 . . . . .	58
2.3.5 「Tangible Playroom」 という呼称について . . . . .	60
<b>第 3 章 提案システムの開発</b>	<b>61</b>
3.1 開発概要 . . . . .	61
3.1.1 床面への映像投影 . . . . .	61
3.1.2 触覚提示可能な直接的インターフェイス . . . . .	66
3.1.3 物理とキャラクタの運動シミュレータ . . . . .	66
3.1.4 処理の流れ . . . . .	66
3.1.5 プロトタイプの開発 . . . . .	67
3.2 コンテンツ：ペンギンホッケー . . . . .	68
3.2.1 対象として設計した遊戯者 . . . . .	68
3.2.2 設定ルール . . . . .	68
3.2.3 投影映像 . . . . .	68
3.2.4 キャラクタの設定 . . . . .	69
3.2.5 物理モデルの設定 . . . . .	69
3.2.6 触覚力覚提示 . . . . .	71
3.2.7 その他の開発項目 . . . . .	72
3.3 まとめ . . . . .	72

<b>第 4 章 提案システムの評価</b>	<b>73</b>
4.1 エンタテイメントシステムの評価 .....	73
4.1.1 展示発表を通した実験 .....	74
4.1.2 実験室における実験 .....	75
4.2 アンケートによる主観評価 .....	75
4.2.1 設定したアンケート .....	76
4.2.2 体験者について .....	76
4.2.3 コンテンツに対する反応 .....	76
4.2.4 触覚力覚に対する反応 .....	78
4.2.5 テレビゲームとの比較 .....	78
4.2.6 年齢に対する触覚の感想の差異について .....	80
4.3 実験者による観察 .....	80
4.3.1 体験者の振る舞い .....	80
4.3.2 観察より .....	83
4.4 海外における実験 .....	83
4.4.1 体験者について .....	83
4.4.2 自動計測による提案システムの評価 .....	85
4.4.3 触覚の有無に対する体験者の振舞い .....	87
4.5 実験コンテンツを用いた実験 .....	87
4.5.1 床面ディスプレイに対する評価 .....	90
<b>第 5 章 結論</b>	<b>92</b>
5.1 展示発表を通した実験より .....	92
5.1.1 触覚を使うまでの考察 .....	92
5.1.2 体験時間について .....	92
5.1.3 より詳細な評価についての考察 .....	93
5.1.4 その他のコンテンツの可能性 .....	93
5.2 まとめ .....	96
5.3 関連発表 .....	97
5.3.1 論文 .....	97
5.3.2 展示発表 .....	98
5.3.3 受賞 .....	98
5.3.4 一般出版物掲載 .....	99

目 次	iv
参 考 文 献	100
謝 辞	106

# 図 目 次

1.1	カイヨワによる「遊び」の分類 . . . . .	14
1.2	「遊び」の研究に関する主要な人物 . . . . .	16
1.3	本論文における「遊び」の特性 . . . . .	20
1.4	ムーアの法則 . . . . .	24
1.5	東工大佐藤研究室で研究されている「D-Vision」 . . . . .	29
1.6	スケーラブルシミュレータ . . . . .	32
1.7	本論文におけるエンタテイメントシステムの定義 . . . . .	35
1.8	テレビゲームシステム黎明期の代表作「PONG」(米 ATARI 社,1972) . . . . .	38
1.9	「GT Force」と「DUALSHOCK2」 . . . . .	39
1.10	「AS-1」と「SKY CRUISING」 . . . . .	40
1.11	「Fantastic Phantom Slipper」 . . . . .	41
1.12	「the Labyrinth Walker」 . . . . .	43
1.13	「Dynamo:taboo」 . . . . .	45
2.1	「PingPongPlus」(MIT,1998) . . . . .	51
2.2	「KidsRoom」(MIT,1996) . . . . .	52
2.3	「Swamped!」(MIT,1998) . . . . .	54
2.4	提案要素とシステム構成の対応 . . . . .	55
2.5	藤幡らの「SmallFish」(2000,日本科学未来館収蔵) . . . . .	57
2.6	タンジブル・プレイルーム(想定図) . . . . .	59
3.1	提案要素と実装上の対応 . . . . .	62
3.2	マルチプロジェクト方式 . . . . .	63
3.3	天井鏡方式 . . . . .	64
3.4	モバイルフレーム方式 . . . . .	65
3.5	コンテンツ：ペンギンホッケー(床面への投影映像) . . . . .	69

3.6 キャラクタデザイン, 重さと寸法 . . . . .	70
3.7 ペナルティ法による衝突量算出 . . . . .	70
4.1 体験者の様子 . . . . .	82
4.2 海外での体験者 (6歳男児) . . . . .	84
4.3 海外での体験者の様子 (1歳半) . . . . .	84
4.4 体験者の年齢層と体験時間 (海外) . . . . .	85
4.5 自動計測とオペレータ測定によるシーケンス長の比較 . . . . .	86
4.6 触覚なし (上), 触覚あり (下) . . . . .	88
4.7 触覚なし (上), 触覚あり (下) . . . . .	89
4.8 実験コンテンツ「床と球」 . . . . .	90
4.9 床面-壁面実験 . . . . .	91
5.1 コンテンツ例 1: 「地形ビジュアリゼーション」 . . . . .	94
5.2 コンテンツ例 2 「気球ライトシミュレータ」 . . . . .	95

# 表 目 次

1.1	ピアジェによる「遊びの段解説」	17
1.2	代表的な GPU の性能と特徴	25
1.3	IPT の追従型/非追従型による分類	27
1.4	各作品における要素の強さ	46
4.1	体験者の年齢と感想	77
4.2	触覚に対する印象 (年齢層別)	79
4.3	テレビゲームとの比較 (年齢層別)	81

# PDF版における増補

## PDF版公開によせて

本PDFは白井暁彦の東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻における博士(工学)【第1535076号・平成16年3月26日】取得時の学位論文「床面提示型触覚エンタテイメントシステムの提案と開発」をインターネット上で公開するためのPDF版として再度TeX原稿より改訂なしで作成したものである。

学位論文執筆後、(財)NHK-ES・次世代コンテンツ研究室におけるポスドク研究員(2003-2004)、その後のフランス ENSAM Precense and Innovation 研究所(Laval市)におけるテーマパーク開発プロジェクト(2005-2007)、日本科学未来館・科学コミュニケーター(2008-)などの研究活動、科学コミュニケーション活動に従事しており、日々を多忙にこなしていく中で、自らの学位論文の内容やその位置づけが、後進の研究や、他の研究分野にとってどれほどどの価値があるのか、あるいは無いのか、全く判断が付かず、またそれを熟考精査する時間的・精神的余裕もないほどに、この5年という時間を本論文について経過させてしまった。まさに光陰矢のごとしである。

5年の歳月を経て、ハードディスクの奥底に安置していた原稿を、PDF版として公開する勇気と決意を与えてくれた切っ掛けは、ある研究者からの問い合わせであった。本論文の前半部分を纏めた「エンタテイメントシステム」は芸術科学会論文誌をいただき、オンライン学会誌という性質上、芸術科学会ホームページにて公開されていた。本論文についての問い合わせはその後も多くいただいており、その後のメディアテクノロジーやエンタテイメントシステムの工学的デザインメソッド、その評価手法などは、潜在的に多くの学生や研究者が興味を持つ分野であることを感じてはいたのだが、特に受賞に寄せた私自身のコメントを引用し「博士論文をするにあたり、学位論文を参照したい」という照会をいただいたことは、純粋に光榮であると同時に「いつか本論文を相対的に位置づける時がくる」と未来の自分に託した仕掛けが忘れた頃に届き、衝撃であった。本論文中で扱っている内容は、現在の職においても非常に重要なアプローチを持っており、展示物の開発に限らず、現在の子供とエン

タテイメントシステムを取り囲む環境や、発達心理学、リハビリテーション手法、インターラクションデザインにおける理知的な方法論など、自分自身の論文に学ぶことは多い。

本 PDF は 2004 年 3 月当時の原稿をそのまま改訂せずに作成している。もちろん、読みほどくにあたっては、この 5 年間に起きた他の研究開発、環境の変化、私自身のその後の研究について考慮しなければならない。また学位論文という性質上、議論を拡散させずにスマートに纏める必要があり、最大時で 200 ページ以上あった論文を 100 ページ程度に収めるため、文面に表れない考察や実験試行などが数多く存在している。前掲「エンタテイメントシステム」のように、別論文として投稿されたものは希有なケースであり、TeX のソースにコメントアウトとして残されているものや、使用されなかった図版として EPS や XLS のみが残っているもの、既に書いたゲームジャンルの分類手法に関する論文など割愛された項目は数多い。博士論文を執筆する上で、指導いただいた佐藤誠教授とは最後の最後まで、この表現しがたい取捨選択、断腸の思いを衝突させあう日々が続いたことを記憶している。その英断技術の伝授も含めて、改めて感謝を記したい。一方で、小池助教授にご指導いただいた JST さきがけ「協調と制御」に関連した成果など、今考えればもっと積極的にデータを取得し、内容的に堅い論文を書き発表しておくべきだったと後悔している。実際のところ、笑い話のようであるが博士 3 年目に誕生した第一子が、自身の仮説を実証し論文化する過程を追い抜く速度で成長していたのも背景として思い起こすべき点で、もし、この文字通り「生きたサンプル」に影響され、乳幼児の発達過程まで考察した実験などを行っていれば、今も学位取得どころか卒業も危うかったと感じている。

当時を振り返りつつ、特筆すべき点として、学位審査会や公聴会にむけてディスカッションされた点が 2 点あったことを付け加えておく。ひとつは「エンタテイメントシステムの評価手法」、そして「この提案が人類の歴史にどのような影響を与えるか」である。前者は佐藤教授から工学博士を取得するための条件として設定され、半年以上かけて「遊び」そのものの定義や「自然な遊技状態」における実験の再現、実験を意識させずに自然な形で被験者の物理データを取得し、アンケートなどの既存の主観評価ではなく躍動感や振る舞い、興味の持続などを時間や長さ、周波数や誤差といった物理的客観評価を行う手法を数多く生み出した。博士論文執筆前後も多くの課題を残したが、本稿では議論の拡散を避け、その後の課題はフランスにおける研究活動において、言語非依存・無意識・他文化の遊技活動におけるデータを数多く取得し論文も数点執筆している。この分野は産業技術であり、論文はそれほど多くはないが、その後のオンラインゲームにおけるユーザー活動の分析などで機械学習と連携して多くの技術が生まれている。後者の「人類への寄与」は公聴会における長谷川教授の質問であったと記憶しているが、当時は『エンタテイメントシステムは人類の幸福に直接寄与するコンピュータシステムである』という回答を用意した。博士審査当時は東工大の工学博士の格の高さと誇りを真剣に突きつけられた思いであった。現在ではフランスや科学館

での経験を持って、より広く深い洞察を持って、本研究における社会的・科学的寄与が期待できることを自信を持って語ることができるはずである。

最後に、この5年における環境の変化やその後の研究活動について、エクスキューズにならない程度にキーワードを列挙しておく。まず、2006年の任天堂革命ともいえる「Wiiの登場」は考慮せねばならない。このプロジェクトの牽引を行った岩田社長が2002年のGDCで感じていた違和感は、まさに私が2001年にゲーム業界から東京工業大学博士課程に復学した瞬間に感じていたものに近い。奇しくも佐藤教授は「家庭用テレビゲームに影響を受けていない低年齢の子供に注目せよ」という課題を設定し、等身大没入映像環境における壊れない触覚ディスプレイ SPIDARと物理エンジンを中型遊戯施設に落とし込むという解に到達したが、任天堂はまず「全身インタラクション」を家庭用ゲーム機に標準コントローラーとして普及させることに着眼し、実現した。革命後の世界の常識は大きく変化したが、本論文は前提こそ違えど、狙いも設計もズレではおらず、その後の私のWiiRemote関連の研究成果や非言語物理評価手法などを組み合わせて、この先5年、「壊れない触覚ディスプレイ」と「物理エンジン」を最大限に利用した次世代のゲームプラットフォームに向けて、活用できると考える。その他、液晶プロジェクタの価格低下や「ムーアの法則」の崩壊、「イマージョン社」によるゲームプラットフォーム各社に対する触覚レンダリング技術訴訟などは全く考慮されていない。「脳トレ」に代表されるトレーニング目的のエンタテイメントシステムは、本論文の定義によると「遊技状態ではない」と明確に定義することができるが、混沌とした「遊びと利得を混ぜた状態」で評価するよりは、本論文のような分類と定義をまず行った上で実験を設定することが望ましいという考察は変わらない。

最後に、本論文に関するディスカッション、改訂や書籍化について、時間さえあれば積極的にすすめていきたいと考えている。論文等への引用を希望される場合は遠慮無くご連絡いただければ幸いである。本論文が情報科学やエンタテイメントシステムの発展のみならず、人類のあくなき探求心の一助になれば幸甚である。

平成21年1月 白井暁彦 (shirai atmark mail dot com)

## 概要

本論文『床面提示型触覚エンタテイメントシステムの提案と開発』は、没入感の高い大画面映像提示や触覚提示、3次元位置入力可能なインターフェイス技術といった、バーチャルリアリティ技術を応用することにより、子供向けの新しい遊びを提供するエンタテイメントシステムを提案し、その開発、評価について述べるものである。

第1章は序論として、研究背景として理解するべき遊びの科学的研究、エンタテイメントシステム、バーチャルリアリティについて、その歴史、基本概念、技術動向、関連研究について概説を述べている。まず「遊び」の科学的研究とその歴史に注目し、中世、近代、現代の関連研究を紹介している。遊びを研究する上での問題点、その分類、現代心理学や知能システム科学との接点から、本論文で述べる「遊び」について定義を行っている。続いて、本論文の基盤技術である「バーチャルリアリティ」について、その基本概念と歴史を述べ、近年の半導体技術の進歩による影響を踏まえた、リアルタイムシミュレーション技術、没入型映像提示技術、ヒューマンインターフェイス技術について技術動向、本論文と関連のある応用例を紹介している。序論の結びとして、本論文の中心である「エンタテイメントシステム」についてその定義を行い、近年の技術動向や関連研究を紹介し、本論文における研究の目的を定義している。

第2章においては、本論文の中心である「床面提示型触覚エンタテイメントシステム」について、その提案を行っている。まず、子供とエンタテイメントシステムの関係について、幼稚園における観察や、提案システムと似たシステム構成である過去の研究事例である「バーチャルバスケットボール」を子供に適用させた場合における検討を行い、次いで本研究において重視する要素を「日常的な遊びの空間で体験できること」、「身体的・直接的なインタラクションの実現」、「法則性のある世界構築」の3点とし、他の研究事例を通して比較検討した。最終的に、この注目する3つの要素から、実装上の特徴として床面への映像投影、触覚提示可能な直接的インターフェイス、物理とキャラクタの運動シミュレータを利用した、部屋空間全体を遊戯空間としたエンタテイメントシステムを提案した。また提案システムの呼称を「タンジブル・プレイルーム」とし、その外観想定図とともに、提案システムのねらいを解説している。

第3章は「提案システムの開発」とし、前章で提案したシステムの特徴に対する開発の詳細を述べている。まず床面への映像投影方式として試作をおこなった4方式、「マルチプロジェクション方式」、「天井鏡方式」、「モバイルフレーム方式」、「デスクトップ方式」のそれぞれについて、その再現可能な技術情報と構築のための材料等について述べている。次いで、触覚提示可能な直接的インターフェイスの実装として、糸張力式力覚提示装置SPIDARを部屋空間に応用するための技術情報について述べている。また物理とキャラクタの運動シ

ミュレータ、処理の流れについて述べた上で、実際に提案システムを再現するまでの、注意すべき技術情報について記載されている。次いで、代表的なコンテンツである「ペンギンホッケー」開発の詳細な技術情報について、特に、剛体の運動方程式と、ペナルティ法を用いたリアルタイム物理シミュレーション、触覚のエンタテイメントシステムへの利用についての詳細について述べられている。

第4章は「提案システムの評価」について述べている。まず、小児医療の現場におけるVRを用いた臨床例の評価に関するレポートを引用し、子供を対象としたVRを評価するための一般的な手法が確立されていないことを述べた上で、提案システムが対象としている子供の自然な遊びの状態を測定する方針について、本論文が採用した手法について述べられている。評価は、実験室による基礎特性実験に加え、7回にわたる展示発表を通して行った実験者による観察、アンケート、遊戯中の体験者の動作軌跡による解析について報告されている。アンケートによる主観評価は特に、被験者の年齢層の違いに対する触覚の感想の違い、テレビゲームシステムとの比較が報告されている。動作軌跡による解析は、触覚提示用グリップの把持状態から自動抽出した体験開始から体験終了までの時間測定と、動作軌跡を用いた分析を行っている。特に、提案要素の中で重要な要素である、触覚をコントロールした場合における被験者の振る舞いの変化について、その速度と移動範囲について変化が表れるなどを報告している。

第5章は「結論」として、本論文をまとめるとともに、提案システムの開発について、展示発表を通じた総合的な考察と、評価のより詳細な手法に関するより考察を述べ、将来的な研究の可能性とともに、提案システムの特色を積極的に利用した、想定されるコンテンツ例を2例紹介している。(2,004字)

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 はじめに

本論文『床面提示型触覚エンタテイメントシステムの提案と開発』は、没入感の高い大画面映像提示や触覚提示、3次元位置入力可能なインターフェイス技術といった、「バーチャルリアリティ技術」を応用することにより、子供向けの「新しい遊び」を提供するエンタテイメントシステムを提案し、その開発、実験、評価について述べるものである。

家庭用テレビゲームシステムを代表とする近年のエンタテイメント技術に関わる分野の進歩発展は目覚しい。米国では、ハリウッドに代表されるエンタテイメント産業が力強く、市場規模や応用分野の広さだけでなく、研究投資、研究交流活動が活発で、エンタテイメント技術の研究先進国といえる。しかしながら、我が国においては、まだまだ学究的取り組みが目立って行われていないのも現実である。

特に近年のエンタテイメントシステムを構成する技術であるコンピュータグラフィックスや、ヒューマンインターフェイス技術に関する研究が、欧米諸国では、コンピュータサイエンス分野における「人間-コンピュータシステム間のインタラクション技術」として包括的に扱われる事に対して、我が国においては、情報処理やデバイス開発といった個々の離散した研究として取り組まれることが多い事も原因であろう。また、エンタテイメントシステムにおける技術的要素の明確化や、その位置付けも曖昧であり、学究的取り組みを阻害している要因といえる。

エンタテイメント、すなわち「娯楽活動」や「遊び」は、人間の基本行動の重要な要素であるにもかかわらず、一般的に、科学工学系分野で扱われづらいテーマであるということは否定できない。特にシステム開発を研究テーマとする場合、他の類似技術を使用したシステ

ム、例えば作業ロボットの開発や、ユーザビリティの向上を第一目的とする感覚代行システムの開発等と比べ、研究開発成果の評価が非常に難しいと言われる点も要因であろう。

いくつかのバーチャルリアリティやロボット技術の研究事例では、エンタテイメントシステムとして開発された提案システムであるにもかかわらず、あえてその評価や位置づけにおいて、利用分野や目的を「遊びのため」とせず、他の産業向けの基本技術の応用例や、教育、時には芸術に置き換えて取り扱われることも多い。しかしながら、そのような位置づけでは、提案システムのエンタテイメント性に関する本質を不明瞭にするばかりで、エンタテイメントシステム研究開発の本質に迫ったとは言えない。

本論文では、このような研究背景を鑑み、まず序論として整理すべき「遊びの科学的研究」、「バーチャルリアリティ」について、その歴史、基本概念、技術動向、関連研究について概説を述べる。

次いで、「エンタテイメントシステム」の定義を行い、過去の事例の引用から、提案した定義の妥当性の検証を行う。また、本論文における、提案システムである「床面提示型触覚エンタテイメントシステム」においては、特に対象者として子供に注目しているので、他の事例の紹介とともに扱うべき問題点の明確化をする。

## 1.2 論文構成

本論文は5章から構成されている。

各章の主な内容を以下に示す。

**1章:** 本章は序論として、研究背景として理解するべき遊びの科学的研究、バーチャルリアリティ、エンタテイメントシステムについて、その歴史、基本概念、技術動向、関連研究について概説を述べている。まず「遊び」の科学的研究とその歴史に注目し、中世、近代、現代の関連研究を紹介している。遊びを研究するまでの問題点、その分類、現代心理学や知能システム科学との接点から、本論文で述べる遊びについて定義を行った。続いて、バーチャルリアリティについて、その基本概念と歴史を述べ、近年の半導体技術の進歩による影響を踏まえた、リアルタイムイシミュレーション技術、没入型映像提示技術、ヒューマンインターフェイス技術について技術動向、本論文と関連のある応用例を紹介した。また序論の結びとして、本論文に関連のある「エンタテイメントVR」について簡単に紹介している。

**2章:** 本章においては「床面提示型触覚エンタテイメントシステムの提案」とし、序論の流れから、まず本論文で扱う「エンタテイメントシステム」についてその定義を行

い、過去の研究事例を用いて、提案した定義の妥当性について検証を行う。特に本論文における研究の目的として、「子供向けのエンタテイメントシステム」を設定し、他の研究事例における問題を指摘、提案システムである「床面提示型触覚エンタテイメントシステム」の基本概念を述べ、開発を進める上での注目すべき設計要素を解説する。

- 3章:** 本章は「提案システムの開発」とし、前章で提案した設計に対する実現において、触覚と映像、リアルタイム物理シミュレータをエンタテイメントシステムとして利用する上での実装について述べる。
- 4章:** 本章は「提案システムの評価」として、子供向けエンタテイメントシステムを評価する上での問題点をふまえ、実験用コンテンツを用いた実験室内での評価、海外を含めた複数回の展示発表を通じた、提案システムの評価、アンケートによる主観評価、観察などを報告する。
- 5章:** 本章は「結論」として、本論文をまとめるとともに、提案システムにおいて想定されるコンテンツ、応用、技術的課題について考察している。

## 1.3 「遊び」の科学的研究とその歴史

### 1.3.1 はじめに

現存する旧石器人の絵画のひとつであるフランス・ラスコー洞窟の壁画には、オーロックス(原牛)やウマ、カモシカなどの図画や、最近では動物に模した星座や月の位置といった彩色図画が発見されている[1]。1万6500年ほど前の氷河期に描かれたこの壁画は、絵を書き残すという古の人類によるartであると同時に、狩猟の方法や暦といった技術の記録という意味でとらえれば、現存する旧石器人類のengineeringの一端であるともいえる<sup>1</sup>。この壁画を描いた人物が、当時どのような目的で、この著作を壁面に残したのかの解明は想像の域を出ないが、少なくとも、当時の人類が、狩猟や捕食といった生命の維持に直接関係した行動だけではなく、「遊び」や「楽しみ」、芸術活動といった要素が含まれる、一見すると不可解な行動をとっていた点に関しては事実といえよう。

「遊び」について注目した研究の歴史は長い。その研究分野は大きく分けて3つに分けることができる。まず「人間はなぜ遊ぶのか」、「なぜ面白いと感じるのか」といった源流や遊びの理論に関する研究(古典的遊び論)，次に「その遊びはどのような種類のものであるか」という分類(近代的遊び論)，さらに、実際の遊びの様子を観察し、行動から分類、動機、発達に結びつける研究である。これらは近代から現代にかけて、時代や科学の発展において「人間とは何か」といった研究とともに、常に問い合わせられてきた。発端は哲学、心理学、生理学であったが、その後、より掘り下げられ、文化学、言語学、教育学、民俗学といった人文社会科学への影響を強く与えるとともに、発達心理学や児童心理学をはじめとする心理学の基盤構築に大きく寄与してきた。

またこの歴史は、現代のエンタテイメントシステムを通じた、人間や心の問題を扱う工学的研究を試みる上で、背景として知っておくべき知識であるため、本節で簡単に紹介する。

### 1.3.2 「遊び」の研究の源流

ロシアの児童心理学の指導者エリコニン(Эльконин, Д. Б., 1904-1984)は著書『遊びの心理学』(原著1978年)の中で、「遊び」に関する理論的研究とその源流について、心理学者の見地から以下のようにまとめている[3]。

遊びの理論的研究の始まりは、F.シラー、H.スペンサー、W.ヴントといった19世紀の思想家の名前と結びついている。ただし、この時代の研究は、自己の哲学的見解、心理学的

<sup>1</sup>近年、仏南西部キュサックの洞窟(2000年)や、仏南東部ショーベ洞窟(1994年)で発見された線刻画が、放射線微粒子加速装置による鑑定で約3万年前とされており、“人類最古の図画”ではなくった[2]。

見解、主として美学の見解を作り上げる際に、最も広くいきわたっている生活現象のひとつとして遊びにも触れ、その際に、遊びの発生と芸術の発生を関連付けたものが多い。

例えば、F. シラー (Friedrich von Schiller, 1759-1805, ドイツの詩人、戯曲家。ゲーテとともにドイツ古典主義) は、人間の美の教育に関する手紙の中で「ライオンが空腹でなく、猛獣が戦いを挑まないときには、余った力そのものが自ら自己目的となる。ライオンは、荒野を力強い吼え声で満たし、有り余る力は目的のない消費によって、自らを楽しませる(略)」と記している。これは「余剰エネルギー説」と呼ばれる「遊びの源流」に関する主要な理論である。シラーにとって遊びは美的活動であり、外的必要性から切り離された「余剰のエネルギー」は美的楽しみが発生するための条件でしかない。またその美的楽しみは遊ぶことによってのみ得られるとされ、遊びを含めた美的活動への動機として一般化されている。この16世紀のシラーによる余剰説は「遊び」の自己目的性や非生産性を鋭く指摘しており、後世にわたって引用される。

H. スペンサー (Herbert Spencer, 1820-1903, イギリスの社会学者、社会を生物と同じような有機体であると考える社会有機体説が有名) は1897年に、シラーの余剰エネルギー説をより広い進化論的生物学の文脈の中で問題にし、遊びは「まさに人工的な練習である」としている。「自然に行われる練習ではエネルギーがあまる結果、発散の準備をし、虚構活動の中で不十分な実際の活動の場への出口を探す」とし、美的活動と遊びの違いは、「遊びには、より低い資質が現れることのみ」であるとしている。

また W. ヴント (Wilhelm Wundt, 1832-1920, 心理学を哲学から独立した学問へと導いた近代心理学の祖の1人、世界で最初の心理学実験室を開設した) は1887年に「遊びは子供の労働である」とし、遊びを社会歴史的見地に含めた。これらの源流諸説は体系的遊びの理論といった視点の研究ではなく、美的活動の発生という文脈の中で、遊びの本性を検討している。

古典的遊び論は「余剰エネルギー説」の他にも、労働によって蓄積された疲労と緊張をレクリエーションによって除去する「気晴らし説」、遊びは本能の産物であり、成長後の生活に欠かせない行動獲得であるとする「本能的生活準備説」、行動的な進化の鏡、すなわち遊びは系統発生的連続を個体発生的にリハーサルしているという「反復説」などが論じられている。この時期の特徴としては、生物学的知見を基盤としており、「遊び」を行う当の本人にとって「遊びが何を意味しているか」は問わず、その役立つ目的を二次的に論及したにすぎないが、人間個人の内部に「遊ぶ精神」と考えられるエネルギーが内在することや、遊びが持つ客観的な構造が歴史的に受け継がれていることを指摘するなど、素朴に見える遊戯行動が以下に多くの観点から論ずることが可能かを示した時期であるとも言える。

近代的遊び論では「遊びの因果関係を踏まえて前後の出来事をつなぐ試み」が特徴付けられる。人間性を回復補充するために行われるとする K. ランゲの「補充説」、フラストレー

ションや攻撃性を取り扱うと強調した H.A. カー, S. ミラーらの「カタルシス(浄化, 排泄)説」, 日常生活とは別に自己表現を可能にする活動を求める E.D. ミッケル, B.S メーソンらの「自己表現説」がある. [4, 13]

### 1.3.3 「遊び」の分類

近代から現代への遊び論への転換は, 文化的基礎としての遊びを論じたホイジンガ, 社会や文化の指標として遊びを捉えようとしたカイヨワの両者が, 現在の遊戯論の基本スタンスを作り上げたといつても過言ではない.

ホイジンガ (Johan Huizinga, 1872-1945, オランダの歴史・文化史家でありレイデン大学学長, 『中世の秋』が有名) は, 比較言語学, 文化史学者の視点から, 中世から近代における遊び研究を見事に整理した人物である. 代表的な著書『ホモ・ルーデンス (homo ludens; 遊戯的人間)』(1938)において, 遊ぶという一見不真面目に見られる行為が, 考えられているより真面目な機能を果たしていて, 人間文化の本質と密接に関わっている, という問題提起をしている. 中世末期の文化の基調とは一種の夢と遊びであり, そこで彼は遊びの本質とその表現形態を考察し, 「遊び」は「文化」を生みこれを支えるものであるという結論を導いている [6]. ホイジンガ曰く, 「遊び」の形式的特徴は, まず「遊び」という概念が, それ以外のあらゆる思考形式とは常に無関係であることを述べながら,

- (1) 第一に「自由な行為」である. 命令されてする遊びはもはや遊びではない.
- (2) 「必要」や「欲望」の直接的満足という課程の外にある. また遊びは, この欲望の課程を一時的に停止させる.
- (3) 日常生活から「場と持続時間によって区別される」. 完結性と限定性が「遊び」の特徴を形作り, 反復が可能になる.
- (4) ひとつの固有な「絶対的秩序」が統べている. 「遊び」は秩序を創り, 秩序そのものである.
- (5) 「遊びは美しくあろうとする傾向」がある. 秩序や緊張, リズムとハーモニーといった性質がある.

とした.もちろん, 文化史学者の視点であり, 論理的に脆弱な点もあるが, これは「現代の遊び」においても共通な特徴として共感できる点がある.

現代に入り, カイヨワ (Roger Caillois, 1913-1978, フランスの代表的知識人といわれる思想家) は, その一生を通して「聖なるもの, 戦争, 遊びや賭け事, 夢」といった, 人間の心

を騒がせ、魅了し、ときには隸属させる「不可解で抗しがたい情動」についての研究を行った。その代表的著書『遊びと人間』(1958)において、カイヨワはシラーの預言者的直感と、ホイジンガの『ホモ・ルーデンス』における「遊び」の理論的分析と文明の発展における役割の重要性を(その著書としての評価を強く批判しながらも)高く評価した上で、遊びの体系的な分類と、文明にどのような痕跡を残しているか確証することを試みた。カイヨワはホイジンガの説に対し「遊びそのもの」の叙述や分析、また賭博やスポーツなどへの言及を避けていることを指摘し、「遊び」についての基本定義として、以下のようにホイジンガの説を再定義した。

- (1) 「自由な活動」遊戯者が強制されないこと。もし強制されれば遊びはたちまち魅力的な愉快な楽しみという性質を失ってしまう。
- (2) 「隔離された活動」あらかじめ決められた明確な空間と時間の範囲内に制限されていること。
- (3) 「未確定の活動」ゲーム展開が決定されていたり、先に結果が分かっていたりしてはならない。創意の必要があるのだから、ある種の自由が必ず遊戯者の側に残されていなければならない。
- (4) 「非生産的活動」財産も富も、いかなる種類の新要素も作り出さないこと。(賭博のような)遊戯者間での所有権の移動を除いて、勝負開始時と同じ状態に帰着する。
- (5) 「規則のある活動」約束ごとに従う活動。この約束ごとは通常法規を停止し、一時的に新しい法を確立する。そしてこの法だけが通用する。
- (6) 「虚構の活動」日常生活と対比した場合、二次的な写実、または明白に非現実であるという特殊な意識を伴っていること。

ホイジンガに比べ、より洗練され、整理されているといえる。しかしながら、これはあくまで形式的な特性の列挙であり、具体的な遊びを特定していない。遊びは多種多様であり、それを分類する原則は難しいが、遊びに向かう人間の「態度」は、「その対象」によって明らかに異なっている。具体的には「偶然の遊び」と「競争の遊び」である。カイヨワは、この対比に「模擬」と「眩暈(めまい)」を加えることで、すべての遊びは以下の4要素いずれかの役割が優位を占めているとした。

- Agon(アゴン) ギリシア語：試合、競技
- Alea(アレア) ラテン語：サイコロ、賭け

- Mimicry(ミミクリ) 英語: 真似, 模倣, 擬態
- Ilinx(イリンクス) ギリシア語: 渦巻

以下にこの4分類の具体的「遊び」の例を当てはめると,

- Agon(競争): 運動競技, ボクシング, チェス
- Alea(偶然): じゃんけん, くじ, ルーレット
- Mimicry(模擬): 子供の物真似(ごっこ遊び), 人形, 仮面, 演劇
- Ilinx(眩暈): メリーゴーランド, ブランコなど器官の混乱と惑乱の状態を遊ぶもの

としている。

また個々の遊びの秩序についての軸も提案し, その両極として, スポーツやチェスといった厳格な法規のもとで技を競う遊びである「Ludos; 閹技」と, 積み木遊びのようにルールに依存しない遊びである「Paidia; 遊戯」を提案した[7, 8].

カイヨワとホイジンガの研究は, この時代の特徴である遊びの分類化が徹底的になされている. また同時に遊びの本質という面でもよく整理されており, 現代のエンタテイメント制作における実践の場においても引用されることが多い著作である. 本論文においては, カイヨワによる「遊び」の分類を『カイヨワの要素』と呼び, 「遊び」の質に関する要素の呼び名として利用することにする.

#### 1.3.4 言語的定義における問題

エリコニンは同掲書において, 「遊び」の科学的研究における歴史的問題点についても触れている. そもそも「遊び」という言葉には各国語において, 複数の意味をもっている. 純粹な『楽しみ』を意味するだけではなく, 「火遊び」などに使われる『戯れ』, 何かを軽率に扱う『もてあそぶ』といった意味がある. また同掲書の原著はロシア語であり, 日本語には『機械工学的に, 応力を受けるべきものが受けない状態のこと』を示す「遊び」も存在する. また古語においては, ユダヤ人は『遊び』を「冗談, 笑い」といった概念に相応させ, 古代ローマ市民は「ludo」で「喜び, 愉快」を意味した. ゲルマン人は「spilan」で「軽快な動き, その際に得られる大きな満足」を意味した. その後, ヨーロッパすべての言葉で「遊び」が示す言葉は人間の行為の広い範囲を示すようになったという. つまり「遊び」という言葉はその語源から, この言葉が示す厳密な意味において, 共通した科学的概念が存在しない. この多義性と言語的意味を明らかにしないまま, 多くの研究者が「遊び」について共通する

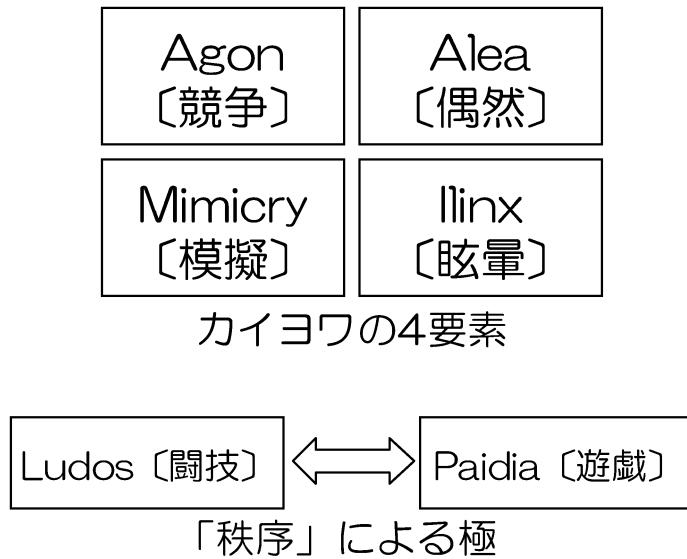


図 1.1 カイヨワによる「遊び」の分類

何かを発見しようとしたことが「遊び」の科学的研究における負の歴史を導いたと述べている（J. コラリーの「Jeux Scientifiques; 科学的遊び批判」<sup>2</sup>）。

同様の言語的定義による取り組みは、前掲書『ホモ・ルーデンス』においてホイジンガも行っている。ホイジンガは比較言語学の立場から、「遊び」をあらわす言葉やその関連語について、ギリシア語、サンスクリット語、シナ語、アメリカ・インディアン語、日本語、セム語、ロマン諸言語、ゲルマン諸言語等について具体的な「遊び」を意味する言葉の有無や、その表現について述べている。『ホモ・ルーデンス』のタイトルにもなった<sup>3</sup>、ラテン語における「遊び(名詞)」は「ludus」、「遊ぶ(動詞)」は「ludo」であるが、ludosには「大競技会」、「学校」といった意味まで含まれていた。さらに ludos の複合語で「風刺する alludo」「遊ぶ colludo」「騙す illudo」といった非真実的な意味もある。ホイジンガは、このラテン語の「一般的遊び」の概念を示す ludo,ludos が他の初期のロマン諸言語に伝わらず、代わりに「冗談を言う、からかう」といった意味をもつ「iocus(名詞),iocor(動詞)」という本来「遊び」を意味しない言葉がその意味範囲を拡大し、ludo,ludos を駆逐したという。

<sup>2</sup>Jeno Kollarits, 1870-1940, ハンガリーの精神病医「人間や動物の広範な活動の中で、遊びの正確な定義や境界を定めることは不可能であり、そのような定義の探索のすべては著者たちの『科学的遊び (jeux scientifiques)』である」と批判した

<sup>3</sup>「人類」を示す「ホモ・サピエンス (考える人、哲人)」に対比させ、「ホモ・ルーデンス (遊ぶ人)」とした。本書の序説には「ホモ・ファベル (作る人)」に対する考察もある。

ラテン語の *iocus,iocor*(ヨクス, ヨコル; ふざけ, ふざける) はそれぞれ, *jeu,jouer*(フランス語), *giuoco,giocare*(イタリア語), *juego,jugar*(スペイン語), *jogo,jogar*(ポルトガル語), *joc,juca*(ルーマニア語) という現在の「遊び, 遊ぶ」を示す語となり, さらに現代欧州言語では「遊び」という言葉が示す意味に, 機械装置がもつ運動に対してもその動詞形が使用されるようになった。ホイジンガは「遊ぶ」という概念が, 言語的な意味では段々と拡大してきている事を指摘している[6]。

ホイジンガは前掲書において, あえてラテン語の「遊ぶ」である「*ludos*」を使うことで「遊び」という言葉が持つ, 原義的多義性の指摘を明らかにし, 議論の発散を回避した。また「面白さ;*aardigheid*(オランダ語), *Art*(ドイツ語)」という言葉を例に挙げ, その意味が「あり方, 本質, 天性」であり, それ以上根源的な観念に還元できないもの, どんな分析も, 理論的解釈も受け付けないものと解説した。

ホイジンガの主張は興味深いが, 本論文ではより客觀性を加えるために, 身近な言語で検証してみたい。まず「面白い」という日本語は『面(おも)白し』で, 目の前がぱっと明るくなる感じを表すのが原義(三省堂「大辞林 第二版」)とされており, オランダ語, ドイツ語とはまったく異なる意味を持つ。

また英語の「面白い」においては, 愉快を示す「*fun*」と, 知的な興味についての「*interesting*」との違いは知られているところであるが, *interest* は語源にラテン語「*inter*; 中間に存在するもの」を持っている。また英語には「楽しみ」を意味する語も複数あり「*amusement*」は楽しみごと, 楽しんでいる状態であり「*entertainment*」は娯楽, 楽しませるもの, となっている(本論文では, 特にシステムについて扱うときは「*entertainment*」に統一して使用している)。

日本語の「遊び」について, 同辞典では『仕事や勉強をせず, 遊戯などをして楽しく時を過ごす』とあり明解でないので, 「遊び」に関連する漢字の意味を「大漢和辞典(大修館書店)」において調べてみると,

- 「遊」旅行する(出歩く)友達のところへ行ったり, 一緒に旅行したりする。『秦時與臣遊(史記)』
- 「游」泳ぐ→水面を浮くようにして泳ぐこと(「泳」は水中を潜行しておよぐこと)。
- 「戯」たわむれる→動作や言葉に重点がある
- 「玩」もてあそぶ→愛でる。よい意味と悪い意味がある。
- 「弄」たわむれる(手の動作に重点がある)

とされており, その手段(触る, 歩く, 言葉, 移動, 泳ぐ)や対象によって, 異なる語であることが興味深い。個々の単語の意味は異なれど, ホイジンガやエリコニンの指摘どおり,

欧州言語と同様な多義性を確認できるため、事前に「遊び」の定義を行わず、漠然とした多義的な「遊び」について研究に取り組めば、科学的に明らかにするのは難しいといえよう。

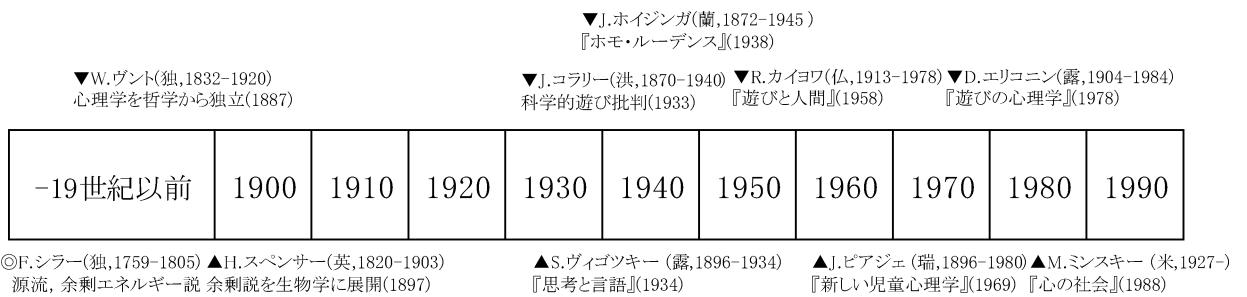


図 1.2 「遊び」の研究に関する主要な人物

### 1.3.5 現代における「遊び」の研究

中世のシラーに始まった、非合理的な行為に見える「遊び」を合理的な行動として理解分類する研究の流れは、ホイジンガやカイヨワらの功績によって、現代の「遊び」に対して、十分適用できる要素として整理できているように見える。しかしながら、現代科学においては、より実験実証的に「遊び」について語られなければならない。

現代、特に第二次世界大戦後の「遊び」の科学的研究は、人間にに関する他の科学的研究分野に分割される傾向がある。この時代の特徴である「遊びの形態を類型化する」という研究スタイルは変容しないが、教育学、社会学、文化民俗学といった人文科学系と、児童心理学や発達心理学といった認知科学、実験的心理学にその場を移し、特に「観察と分析」がその研究の中心となっていく。

ジャン・ピアジェ(Jean Piaget, 1896-1980, スイスの心理学者。心理学、論理学、哲学、数学教育学を学び、実験的臨床法により児童の知能や思考の発達過程を研究、知的操作の構造を明らかにした。著書「新しい児童心理学」など多数)や、エリクソン(Erik H. Erikson, 1902-1994, ドイツの精神分析学者、臨床医。同一性の理論、心理社会的発達段階、自我心理学の総合者。著書「幼児期と社会」ほか)は、認知科学、発達論的視点から、年齢を追うに従って発生する、遊びと知性の統合的な発達の特徴を分類する『発達心理学』の研究分野において数多くの成果を発表した。エリコニンは前掲書『遊びの心理学』において、ヴィゴツキー(Vygotsky, L.S., 1896-1934, ソビエトの心理学者。生物学的、自然主義的理論を批判し、弁証法的唯物論の立場に立つ新しい心理学体系の建設に多数の理論的・実験的研究を通

じて貢献をした。特に幼児や障害児の心理や教育に注目し、注意、記憶、象徴作用、言語、思考などの高次精神機能の発達について教育の役割を重視した研究を行った。代表的著作『思考と言語』、内言と外言など) の研究を扱い、「ごっこ遊び」等における「遊び」に内在する想像、創造性が非日常的な営みの中に、ひとたび実用を離れ、既存の系統学習を加えてさらに高次元の想像を可能にするという、相互依存的な循環過程としての統合を主張した。

特にピアジェは年齢 (period; 時期) を追うに従った分類において、非常に秀逸な「遊びの段階説」を打ち立てているので、一部抜粋する。

表 1.1 ピアジェによる「遊びの段階説」

感覚運動遊び (sensorimotor play)	生後から 1 歳半～2 歳ぐらいまで。 感覚-運動的知能の獲得期。
象徴的遊び (symbolic play)	2 歳～5,6 歳まで。記号化から言語的想起まで。 ごっこ遊び、空想、模倣遊びなど。
ルールのある遊び (rule play)	おおむね 7 歳以降。思考の具体的操作、個人間の関係理解、世界観、因果と偶然が理解できる。 ルールのある遊び、社会的遊び。

上記のような年齢に従って異なる遊びが現出することは経験的にも理解できる現象であるが、「遊び」と「知性」の発達を統合的に述べた点は、その後の教育学的遊戯論、発達論において重要な礎となっている。なお、ここで示される段階の生じる年齢には個人差があるが、各々の段階が生じる順序は一定で順序は変わらないとされている。

これらの「遊び」に関する研究成果は、近年の人文科学や実験心理学の教科書や、研究者が採用する原型として扱われることも多い、知能システムの研究分野においては、マーヴィン・ミンスキ (Marvin L. Minsky, 1927-, アメリカの数学者。人工知能の概念の生みの親の一人。1958 年から MIT 教授。1960 年ごろから人工知能研究の中心的存在として活躍を続け、自然言語理解や場面の理解の枠組みとなる理論である「フレーム理論」や学習機械のモデル「パーセプトロン」の限界に関する証明が有名) も代表的な著作『心の社会』(1985)において、ピアジェらの実験を例とした自らの論の弁証や、冗談を言って「遊ぶ」エージェントの可能性について論じている [11, 12]。

### 1.3.6 その他の「遊び」研究

以上、遊びの研究について、源流から、近代、現代まで概要をまとめた。本節では、その他の近年の研究である「おもちゃ」と「遊びリテーション」について簡単に紹介する。コンピュータ等を用いたエンタテイメントシステムに関しては後に述べる。

#### 「おもちゃ」に関する研究

日本語において「おもちゃ」はもともと「持ち遊ぶ」という宮廷言葉が大衆化して「お」が付き、「おもちゃあそび」になったという[14]。玩具をあらわす「玩」はもとから「玩弄物」という言葉が語源であり、中国語のくだりでも紹介したとおり「玩；もてあそぶ」「弄；戯れる(手の動作)」という意味である。古くは人形遊び、西洋源流におけるプラトンの立体「Platonic solids」など、持つて遊ぶという遊戯行動は古くから行われていたようである。

現代の「おもちゃ」に関する研究は、その産業上の必要性から生まれるマーケティングといった統計的市場分析だけでなく、キャラクター、コレクションといった社会学、行動学的要素、プロモーションを進める上でのメディア戦略、教育玩具における効果、電子おもちゃにおけるヒューマンインターフェイス技術、比較文化、民俗学など多岐にわたってその研究的要素を提供しつづけている。しかし同時に、本論文でこれまで述べてきたような「遊び」についての歴史的背景や、「遊び」の定義を前提としない独善的、表面的、もしくは一方的批判だけを述べる研究も多く、本論文で引用に値する科学的に優れたアプローチが少ないことも否定できない。(本論文の趣旨と外れるので、詳説は避けるが) そのような中でも、松田、森下らの近年の著書は現象として変化しつづける「おもちゃ」と子供や大人を取り巻く現象から、社会学、教育学的分析が深く行われているので、興味があれば参照されたい[13, 14]。

本論文では「おもちゃ」についてこれ以上深く触れないが、特に「持つて遊ぶ」という行為に注目して、提案システムの評価を行っていきたい。

#### 遊びリテーション

「遊び」を介護やリハビリテーションに取り入れ、楽しみながら作業能力・機能回復を行うという活動が三好らの提案による『遊びリテーション』である[15]。近年になって注目されている分野であるが、「レクリエーション療法」として以前から存在していた。「楽しむこと」を通した作業能力・機能回復が「目的」となっており、これまで述べてきた「遊び」において重要な、自己目的性(遊ぶこと自体が目的)や、実世界での無利益性がなく、純粋な「遊び」とはいえない。レクリエーション(recreation)という言葉も、そもそも「仕事や勉強などの疲れを癒やし、精神的・肉体的に新しい力を盛り返すための休養・娯楽(三省堂提供「大辞林 第二版」)」という意味であり、よく使われる用法である組織の連帯強化やな

ども含め、純粋な意味で「遊び」とはいえない(エデュテイメント; edutainment も教育が主目的であれば同様といえる)。

もちろん、機能回復や、生きる活力を得るために効果は注目するべきであるし、長い視点で『遊びリテーション』によって得られる機能回復による行為そのものの無目的化まで含めれば、ここで扱うことができると考えるが、回復や訓練、教育といった「目的を持った遊び」に関する研究や成果は、作業療法、実践教育学等の分野で扱われるべきであって、本論文では直接扱わない事とする。関連する話題として、小児医療の臨床現場においてバーチャルリアリティやテレビゲームシステムを積極利用した例が二瓶らによって行われているが、これに関しては次の「バーチャルリアリティ」の節において紹介したい。

### 1.3.7 まとめ：本研究における「遊び」の定義

以上、「遊び」の科学的研究とその歴史について、本論文に関連ある事項の概要をまとめた。ここでまとめた内容はあくまで、中世シラーを源流とする、近代から現代の原理的「遊び」研究の歴史と概要であり、現代では純粋科学として扱われない分野も紹介した。また冗長を避けるために、扱えなかった人物や研究、戦争などの時代背景もあることを理解されたい。

人間はなぜ遊ぶか、なぜ面白いと感じるか、といった人間解明に迫る分野は、認知科学やロボット開発とともに、現在も知能システム科学分野等において継続して行われている。また扱った論の中には、現代の技術においてより深い追証が可能な実験もあり、「遊び」を研究する上では、前提として理解すべき事項が多い。

特に、エリコニンやホイジンガが述べたとおり、「遊び」は各国語において、多くの異なる意味を持つ。よって研究において注目する「遊び」の定義について基本概念を明確にする必要があるので、まとめとして、本論文における「遊び」の定義をここに定める。

まず「遊び」とは、「遊ぶこと」それ自身が目的となる『自己目的的な行為』であり、以下の特徴を満たすべきである。

- 「自由な活動」いつでも止められること
- 「隔離された活動」日常生活と連続の場所、時間、行為でないこと
- 「未確定の活動」遊戯者に創意や選択の自由があること
- 「非生産的活動」現実世界に財や富を生まないこと
- 「規則のある活動」遊びの世界を支える法則があること
- 「虚構の活動」写実的でもよいが、現実とは区別がつくこと

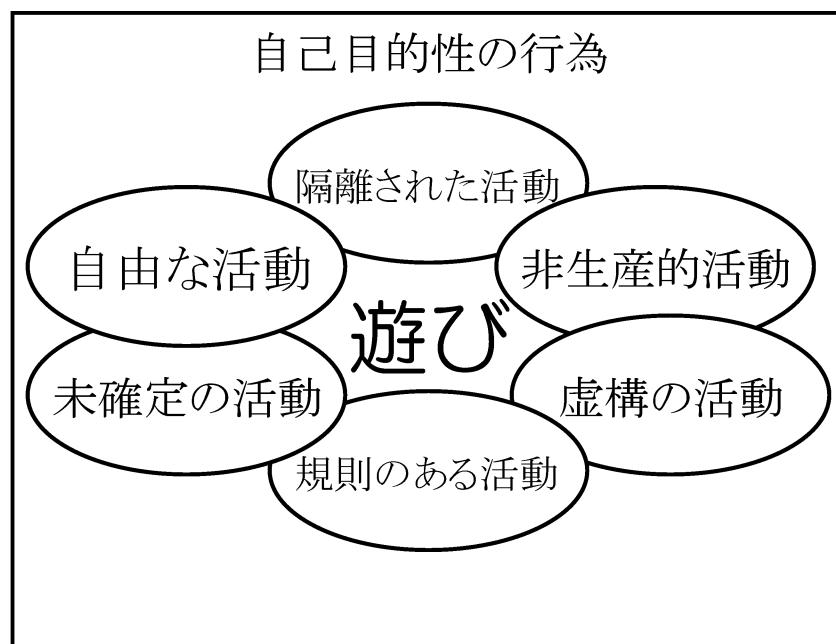


図 1.3 本論文における「遊び」の特性

ホイジンガ、カイヨワが唱えた「遊びの形式的特徴」を基本とした。また、本論文内の用語定義として「遊び(play)」、上記の6点を満たした状態にある人間を「遊戯者(player)」、遊戯者が自発的に上記6点を満たす状況を保つことを「遊戯状態(playing)」と呼ぶことにする。

## 1.4 バーチャルリアリティ

### 1.4.1 基本概念と歴史

バーチャルリアリティ(Virtual Reality, 以下 VR)とは, Virtual(実質上, 本質)のリアリティである。Virtual という英語の初期の誤訳により「仮想」と訳されることがあるが<sup>4</sup>, 学術的には nominal(名目上) や supposed(仮定) ではなく, 実質上の本質的なリアリティについての研究分野を指す[20].

もちろん, 実質や本質といった要素だけが単独で研究されるのではなく, 多くはそのコンピュータ上での再現技術であり, その歴史は, コンピュータグラフィックス(Computer Graphics, 以下 CG), ディスプレイ, ロボット, 通信といった技術と密接に関連している。VR は言い換れば「いま, ここにいながらにして, 別の場所の景色を観たり, 物体を操作できたりする世界」と表現でき, そのような物事の本質や部分的エッセンスだけを取り出して体験できる技術ともいえる[21].

VR 技術の誕生は, アイバン・ザザランドによる「究極のディスプレイ」(1965) といった概念から含めても, 20世紀以降の比較的新しい技術である。用語の発生としては 1989 年, 米国ベンチャー企業である VPL リサーチ社ジャロン・ラニアー (Jaron Lanier) らによる製品「データグローブ」と「アイフォン」とともに一般的に「バーチャルリアリティ」という言葉が使われるようになった。1990 年代には, それまで, CG, CAD, ヒューマンインターフェイス, ロボット制御, 臨場感通信会議システム, 体感ゲーム等の名で呼ばれていたそれぞれの技術が, バーチャルリアリティという共通の研究テーマとして特に掘り下げて研究されるようになった。当時の VR 技術は(1) リアルタイム CG を(2) 立体視可能なディスプレイで表示し(3) データグローブを通した手腕によって入力を行う, というスタイルが一般的であった。

館は国内において, VR 研究とその啓蒙を積極的に行っている研究者であるが, その著書『バーチャルリアリティ入門』において, VR の基本要素として以下の 3 点を挙げている.

バーチャルリアリティの特徴的な点は, コンピュータの生成する人工環境が,

- (1) 人間にとって自然な 3 次元空間を構成しており
- (2) 人間がその中で, 環境との実時間の相互作用をしながら自由に行動でき
- (3) その環境と使用している人間と環境とがシームレスになって環境に入り込んだ状態が作られている

---

<sup>4</sup>1970 年 IBM370 に採用された「バーチャルメモリ」を日本語で「仮想メモリ」と訳したのが発端とされている。

ということであり、これらをそれぞれ「3次元の空間性」、「実時間の相互作用性」、「自己投射性」とよび、バーチャルリアリティの3要素とし、この3要素すべてを兼ね備えたものが理想的なバーチャルリアリティ・システムであると述べている。

またその研究分野において、以下の4点分野を提案している。

- (1) 人工現実感の解明に関する研究
- (2) 感覚提示と感覚・行動相互作用に関する研究
- (3) バーチャル世界の構成手法
- (4) 体内及び外部世界の人工現実感の評価研究

日本においては1995年から1999年の5年間、文部省(現・文部科学省)の重点研究領域「人工現実感の基礎的研究」として、多くの研究者がこの研究分野を推進した[22]。

以上、VRの基本概念とその研究の歴史について概要をまとめた。本論文ではエンタテイメントシステムを通して、上記で提案されている(2),(3),(4)の分野について、研究を行っていく。

続いて、近年のVR技術動向について述べたい。近年のVR技術動向とその研究はリアリティ向上と応用に目が向けられている。本節では特に、半導体技術の進歩による影響、リアルタイムシミュレーション技術、没入型映像提示技術、人間-コンピュータ間対話技術等について技術動向をまとめる。

#### 1.4.2 半導体技術の進歩による影響

近年のコンピュータシステムの高速化は目覚しい。G.ムーア(Gordon Moore、世界最大の半導体メーカーIntel社の創設者の一人)が、1965年に経験則として提唱した「半導体の集積密度は18~24ヶ月で倍増する」という「ムーアの法則(Moore's Law)」の予測を上回る形で、近年のコンピュータ中央演算処理装置(Central Processor Unit以下、CPU)の処理速度は指数関数的に速くなっている[23]。

この法則は、主にパーソナルコンピュータ用CPUの動作クロック周波数の進歩において引用されることが多い法則であるが、近年のCG技術の進歩を支えるグラフィックスプロセッサ(Graphics Processing Unit、以下GPU、画像生成のみを受け持つ補助的処理装置)の性能向上においても、ムーアの法則と同様な現象を見ることができる。表1.2は世界的なGPUメーカーnVIDIA社の世代ごとのGPUの機能と性能をまとめたものである。

この5年間におけるGPU(Graphics Processing Unit)の進歩発展を物理的数値で表現すると、トランジスタ数で約18倍(1.25億Tr、この値はIntel社製Pentium4-2.4GHz約2倍

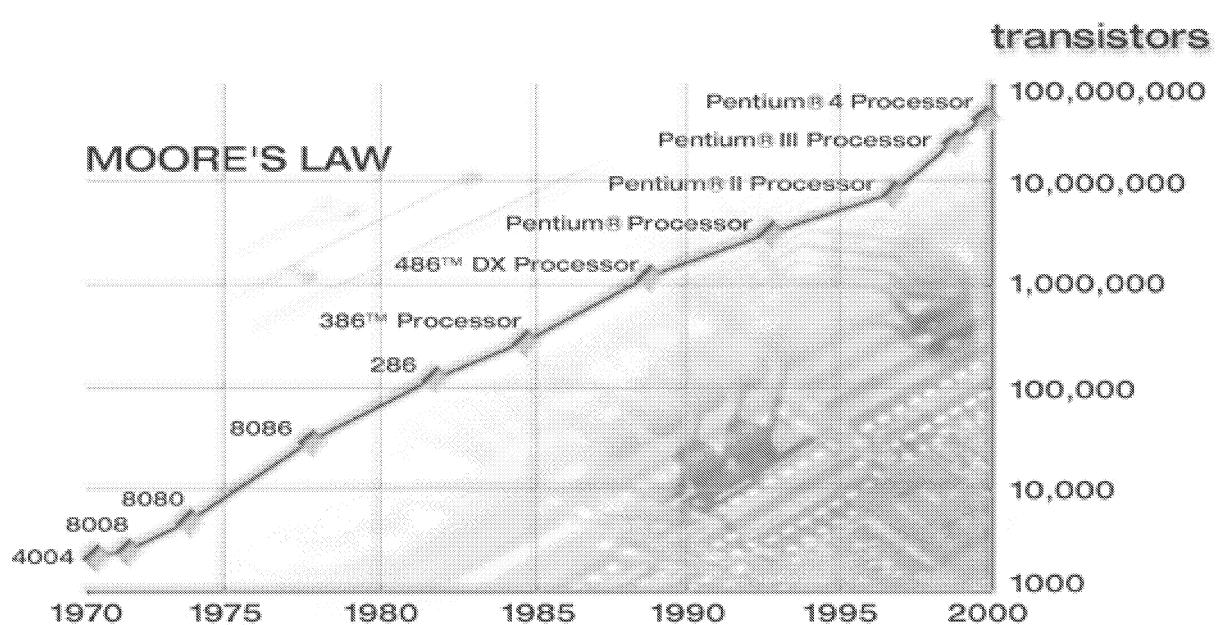


図 1.4 ムーアの法則

表 1.2 代表的な GPU の性能と特徴

年代	製品名	process(μ m)	Tr 数	【2D】	【3D】	特徴
1998 年後半	RIVA TNT	0.25	7M	50M	6M	1
1999 年前半	RIVA TNT2	0.22	9M	75M	9M	2
1999 年前半	GeForce 256	0.22	23M	120M	15M	3
2000 年前半	GeForce2	0.18	25M	200M	25M	4
2001 年前半	GeForce3	0.15	57M	800M	30M	5
2002 年前半	GeForce4 Ti	0.15	63M	1200M	60M	6
2003 年前半	GeForce FX	0.13	125M	2000M	200M	7

<特徴>

【2D】ピクセル処理能力 (M pixel/sec) は Antialias フィル速度

【3D】ポリゴン描画速度 (M triangle/sec)

1:テクスチャ, DirectX 6

2:AGP 4x

3:固定機能頂点 H/W, レジスタ結合, キューブマップ, DirectX7

4:性能向上, DDR メモリ

5:頂点プログラム, 4 テクスチャ, テクスチャシェーダ, DirectX8

6:性能向上, アンチエイリアシング

7:頂点とフラグメントのプログラミング機能, 浮動少數ピクセル, DirectX9, AGP 8x

「The Cg Tutorial」より引用 [24].

の Tr 数にあたる), ポリゴン処理能力で 33 倍(2 億 triangle/sec), ピクセル処理速度で 40 倍(20 億 pixel/sec) となっている。1998 年当時, 世界最高クラスのグラフィックスコンピュータ「Onyx2」(SGI 社) の処理能力が 0.8 億 triangle/sec, ピクセルフィルレート 47 億 pixel/sec (Textured, Antialias) であったことを考えると, 専用のスーパーコンピュータ級のリアルタイム CG 環境がパーソナルコンピュータや家庭用ゲーム機をはじめとするエンタテイメントシステムで入手可能なスペックになってきているといえる(なお価格は 1000 分の 1 程度)。

また, 物理的スペック以外にも, 革新的な進歩がある。従来の GPU では, 映像を生成するレンダリングパイプライン(3DCG を生成する座標変換, 陰面消去, 陰影, 合成処理などの処理)がハードウェア的に固定の設計をされていたが, 現在の流れとして, GPU 上で動作するマイクロプログラムをユーザ側で開発, カスタマイズできるような設計になってきている。これによりレンダリングパイプラインを自由に設計でき, より光の振る舞いに正しいアルゴリズムの実装やまたその高速化, 実際には存在不可能な新しい画像表現など, 速度だけでなく, 映像の表現力と自由度が格段に向上している。

CG 技術, 特にリアルタイム CG 技術の高速化と表現力向上は, 先に挙げた VR の基本 3 要素のうち「人間にとって自然な 3 次元空間を構成」に大きく寄与する基盤技術である。今後とも, その「自然さ」が, 質・量ともに向上することが予測される。

#### 1.4.3 リアルタイムシミュレーション技術

半導体技術の進歩における影響は, CG 技術のみではない。VR の応用や, その世界構築に重要となるリアルタイムシミュレーション(Real time Simulation, 以下 RTS) 技術の演算速度が向上している。RTS 技術は前節に挙げた VR の基本 3 要素のひとつである「実時間の相互作用」を実現するために必要不可欠な技術である。可視化や物体の衝突変形, 新薬や DNA の実時間試行など, 計算機シミュレーション分野では, さまざまな現象が扱われているが, VRにおいては, その感覚提示の種類によっては必要となる「実時間」の周波数が格段に高い上に, 処理も複雑である。そのため初期の VR 技術では『机上の箱を持ち上げる』といった基本的行動ですら, 再現が難しかった。この例では以下のようない物理シミュレーションが想定できる。

##### (1) 体験者の位置の算出

体験者に取り付けられた各センサの位置から, 現在の絶対座標と, 手掌位置を算出。

##### (2) 机や壁との衝突

体験者に触覚をフィードバックする場合, 1kHz 以上の周波数で衝突と反力を算出する必要がある。

## (3) 目標物との把持状態の処理

ルールベースの場合は条件分岐、物理ベースの場合は手掌と箱の制約を解けるモデルが必要。

## (4) ニュートン力学のシミュレーション

質量、慣性、万有引力、摩擦、モーメント等、「箱」の表現によってより複雑になる。

映像のみの場合、上記の RTS を 60Hz-120Hz で処理しなければならない。また力覚触覚等の比較的応答の速い感覚系にフィードバックを与える場合、1KHz~10KHz(もしくはそれ以上高速な程、表現の可能性は高まる)といったオーダーの演算速度が要求される。

もちろん、手を離した場合の落下や物体同士(箱と机)の衝突物理といった現象、ネットワーク VR 環境においてはその通信遅延なども想定できる。RTS の表現が上がるたびに、VR の感覚的リアリティが向上するため、近年の VR 世界構築においては、この RTS 技術をいかに自由度高く、多くの現実世界に存在するモデルを取り入れることができるかが、VR 技術のソフトウェア面での研究焦点となっているといつても過言ではない。

## 1.4.4 没入型映像提示技術

没入型映像提示技術 (Immersive Projection Technology, 以下 IPT) は、大画面高画質、もしくは立体映像など、体験者を覆う視覚的現実感再現技術である。視覚は人間の感覚器の中でも非常に大きな情報入力チャネルとして働くので特に重要である。CG 技術による映像生成以降の映像提示技術に注目すると、IPT は大きく分けて以下の追従型と非追従型があるといえる。

表 1.3 IPT の追従型/非追従型による分類

追従型 IPT	HMD, CAVE, ImmersaDESK, IllusionHole
非追従型 IPT	裸眼立体ディスプレイ, D-Vision, CyberDome

追従型 IPT は映像投影対象となる体験者の視線や頭部の位置や方向を追従し、それに合わせた映像を提示する方式である。初期の VR では、頭部装着型ディスプレイ (Head Mounted Display, 以下 HMD) が VR の代表的映像提示技術であった。HMD はここ数年の技術によって、より高画質化、小型軽量化、低価格化が進んでいるが、根本的弱点として「装着感が大きい」ことは否定できない。他の追従型 IPT の代表的な方式が CAVE 型ディスプレイである。これは複数面の立体映像提示可能なディスプレイを組み合わせて体験者を囲い、体験者

の頭部位置，方向を磁気センサ等で検出することによって高度な没入型映像提示環境を生成する技術である。ディスプレイの面数により CABIN, COSMOS などの呼称がついているが，一般には CAVE 型 IPT と呼ばれる。

ImmersaDESK は CAVE と同じく米国イリノイ大学によって 1992 年に提案されたディスプレイである。通常，傾斜のある 1 面の背面投影方式の立体ディスプレイと磁気センサ等の頭部検出デバイスによって構成される。3 次元マウス等と組み合わせて使用し，VR 環境でのデザインや協調作業に使用されることを想定している。

IllusionHole は北村らによって提案された ImmersaDESK の展開である。円状に穴をあけた遮蔽板を ImmersaDESK の上に高さを持って取り付け，ディスプレイを机状にして利用する。グループディスカッションなどの face-to-face 協調作業環境を想定し，通常 1 名で占有使用する ImmersaDESK を複数名で同時に利用することができるのが特徴である [25, 26]。

追従型 IPT の多くは磁気センサを利用した頭部位置検出による立体映像方式を採用しており，デバイス装着にかかる問題点が多い。しかし近年では，コンピュータビジョンを応用した頭部検出方式が開発されており，先に挙げた半導体処理速度や，安価な CCD カメラの普及，アルゴリズム改善による高速化などの影響で，今後は非装着の追従型ディスプレイの発展も期待できる。

非追従型 IPT の多くは，上記の追従型ディスプレイの弱点を克服すべく「非装着」が可能なディスプレイ方式である。多くの方式は，大画面化，高密度化，多重情報化により，体験者の位置や方向の変化に対してロバストな画像提示方式である。

裸眼立体ディスプレイ（「眼鏡なし 3 次元ディスプレイ」とも呼ばれる）は，近年において特に実用化が進んでいる分野である。三洋電機(株)らによる，プラズマディスプレイや液晶ディスプレイにイメージスピッタと呼ばれる遮蔽板を取り付けることにより高精彩の多視点映像を得られる方式や，2002 年にシャープ(株)によって携帯電話への実用化が可能になったスイッチ液晶による視差バリア方式があり。高精彩大画面化が進んでおり，後者は，2D/3D の切り替えが電気的に可能であることから，既存の液晶ディスプレイ技術と組み合せた，パソコン用や携帯電話用といった発展的用途が期待されている。

その他の非追従型 IPT については，超大画面型ディスプレイについて技術動向を紹介する。近年はプロジェクタを中心とした投影系映像提示技術の普及が目覚しく，特に小型化，高画質化，高輝度化，低価格化が日々進んでいるため，プロジェクタアレイと呼ばれる複数台のプロジェクタと描画用コンピュータの組をネットワークで同期させたシステムが提案，実用化されている。映像用プロジェクタは従来から，映像投影デバイスとして陰極線管(CRT)，液晶素子(LCD)，DMD(Digital Micromirror Device)を利用した 3 種類の方式があり，投影方向もスクリーンとあわせて背面型，透過型などがあり立体化映像化も可能であるが，近年の小型化，低価格化の影響で，映像内に体験者の影を作らず高精彩の映像空間を

再現することが可能になってきた。同研究グループで実験されている「D-Vision」や、松下電工(株)による「CyberDome」、欧州リンク AEC で開発されている「ARSBOX」はその代表的システムであるといえる。プロジェクタアレイの投影面は通常、平面でない場合が多く、構築にはいくつかの技術的課題が存在する。

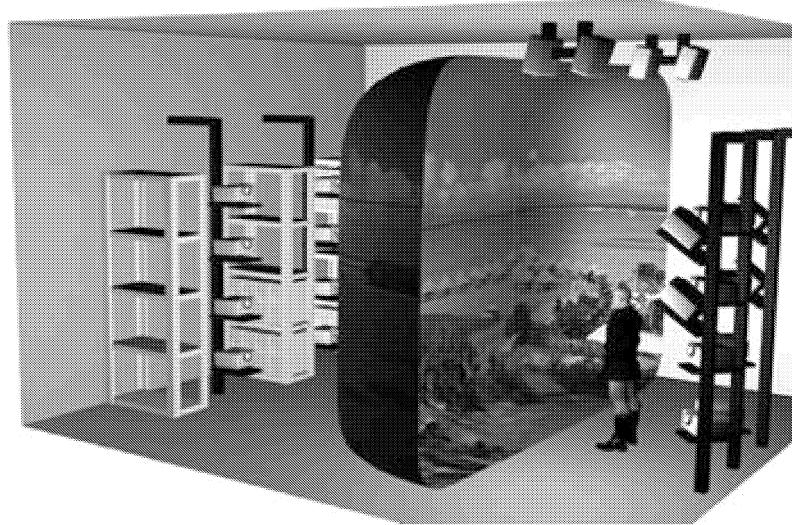


図 1.5 東工大佐藤研究室で研究されている「D-Vision」

まずひとつは投影画像の補正技術である。複数のプロジェクタからの投影映像が切れ間なく映し出されるよう、投影画像の平行位置の調整と投影面までの距離の違いによる拡大縮小補正を行った上で、球面補正、ピント補正を行う。この状態で補正用グリッドを投影し、撮影、評価、補正を繰り返していく。幾何学的な補正是 3DCG を応用して投影面を湾曲させる方法で高速に処理が可能であるが、実際には画像の重なり部分の明るさ、各プロジェクタ光源の経時変化など、品質を追求すれば多くの課題が残る。

また、もうひとつの問題が「立体視での表現の限界」である。CAVE 型のような領域が限られた包囲型立体ディスプレイの場合では、体験者と投影面との距離が比較的近く、提示状態を良好(物理的には投影面の法線と視線ベクトルが正対)に保ちやすいが、D-Vision や Projector Wall タイプの広視野ディスプレイの周辺では、視線ベクトルと投影面の法線のなす角が大きくなり、結果、正しい形状や視差が表現できない状態になる。またこの問題は、立体視だけでなく、方向に対する明るさの変化や最大同時視聴者数とも関連がある問題であり、今後も研究の発展が期待できる分野である [27, 28, 29]。

#### 1.4.5 Human-Computer Interaction 技術

Human-Computer Interaction(以下 HCI) 技術とは、システムと人間を繋ぐ界面の役割を受け持つ技術であるといえる。大きく分けて、デバイスを中心としたマン・マシン (Man-Machine) 間のヒューマンインターフェイス (Human Interface, 以下 HI) 技術と、ソフトウェア的要素も含めたコンピュータシステムとの対話 (Interaction) を行うためのインタラクティブシステム技術である。

HCI は、キーボード、マウスといったデバイス依存のコンピュータ向け入力装置、ディスプレイといった表示装置、エレベータのボタンや自動車のギアレバーなど、我々の生活において多岐にわたっているが、VR 技術の研究における HCI 技術の研究開発は、デバイスが人間の感覚 (視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚等) に対して再現できるリアリティを高める必要があるばかりでなく、日常的に接する人間と世界の界面を汎用的かつ高度に再現する技術を開発する必要性も生まれる。

人間の活動における入出力を汎用的かつ高度に再現できる HCI が理想であるが、研究開発では同時に阻害要素として、位置や座標といった物理要素の違いによる「違和感」、再現している知覚よりもインターフェイスデバイス自身の存在を知覚される「装着感」、体験者が意図した入力・応答精度が得られない「ユーザビリティ」などの問題を解決する必要がある。

例えば、人間の歩行を VR 空間で実現する HCI 技術について考察すると、以下のようないくつかの技術的課題が存在することがわかる。

(1) 歩行状態の検出

体験者の足について、その歩行の 1 歩づつの状態を測定する必要がある

(2) 進行方向、姿勢の推定

立位と異なり、歩行中は重心が身体の中央で静止しているわけではない (覗き込む、横を向くなど)

(3) 歩調の推定

左右脚を運ぶタイミング、stride(歩間距離) によって移動速度、移動距離を求める必要がある

(4) 歩行時の映像提示

通常、歩行時の視覚は動搖しているが意識されない。CG 映像で提示する場合は必ずしも揺らすべきではない (VR 酔いの発生など)

(5) 装着感の少ないデバイス

歩行動作そのものを妨げない、脱着が容易であればなおよい

以上、さまざまな問題が複合的に存在するが、優れた HCI を実現する上では、必ずしもモーションキャプチャのように精度の高い測定システムを利用しなければならないわけではない。これらの問題解決は必ずしも Human Interface(デバイス) 依存ではなく、実現したい Human-Computer Interaction(対話) の要求仕様に沿った必要十分の実装が理想であろう。

同研究のグループの取り組みとして、床面に実装した 4 個の感圧素子の出力を解析することにより、歩調と、進行方向、複数姿勢の推定が可能な「足踏み歩行入力インターフェイス」の開発に成功している。実現したい HCI、VR 世界との対話において、精度は高いが装着物が多いモーションキャプチャ等による足の挙動検出よりも、歩行感覚をふくめた擬似的歩行である「足踏み動作」の検出による入力のほうが、視覚における動搖も含め、総合的に見たリアリティが高いと判断した点が評価できる。

#### 1.4.6 VR 技術の応用

以上のように近年の VR 先端研究は、よりリアリティを追求する方向へ進歩を続けていくが、その応用分野はより裾野を広げている。ここでは、応用の例として、スケーラブルシミュレータ、小児医療と VR、アート作品としての VR について近年の動向をまとめたい。

##### スケーラブルシミュレータ

IPT、特に D-Vision や CAVE といった体験者が直接システムに入り込む形で体験できる大型映像空間は、大きさの知覚を実物と一致させることができる「等身大 VR」を実現しやすい。そればかりでなく、大きさの概念を自由に操ることができる「スケーラブルシミュレータ」の構築も可能である。

都市設計の分野において、景観や日照といったマクロ的視点における都市環境評価に加え、商店街のアーケードや駅からのアクセセンシビリティなどミクロ的視点双方から総合的にシミュレーションを行うことは重要である。建築物は CAD データとして事前に準備することが用意であるため、可視化環境を構築しやすい。D-Vision では、前出の足踏み歩行入力インターフェイスと組み合わせ、評価者が自由に歩行可能なスケーラブルシミュレータシステムを構築し、都市環境評価に役立てている [33, 55]。

##### 小児医療と VR

近未来の VR の応用例として「遠隔医療」等が挙げられるケースが多いが、実際にはネットワークによる遅延や医療倫理的問題等課題もあり、VR 技術によって、外科手術が行われる未来は近いとはいえない状況である。しかしながら、二瓶健二(二瓶健二；国立成育医療



図 1.6 スケーラブルシミュレータ

センター小児神経内科 光過敏性けいれんなどの研究でも有名) 小児医療の臨床現場から、積極的に VR を利用することを提案している。

小児病棟において寝たきりの子どもたちが、音声認識を用いた簡易な HCI 技術を伴う病院のベッドに取り付けられた VR システムにより、遠く離れた親兄弟と会話したり、動物園や外の風景を観て回ったりといったことが可能になる例や、触覚インターフェイスの力を借りてリハビリテーションの導引をしたりといった事例を紹介している。遠隔地から外科手術を行うような大規模で高価で技術的障壁の高い VR でなくても臨床の現場には VR の需要があるという。ただし同時に、VR 医療の副作用や VR を使わない現実体験の重要性についても述べている [30, 31, 32]。

### アート作品としての VR

VR 技術の発展とともに、VR をアート作品における表現として利用するアーティストも多く存在する。先に紹介した館の原理的 VR の定義に沿えば「3 次元でインタラクションを行い、シームレスに環境に入り込めるもの」が VR の特徴であるから、自らの世界を表現し他に伝えることを使命とするアーティストにとって、CAVE 方式のような映像再現環境は理想的なメディアになる場合も多い。

しかしながら VR は依然、技術的比重の大きいメディアであり、工学的開発なしでは創造

性のある世界の表現が難しいことも現実である。多くのVRアート作品と呼ばれる作品群は3DディスプレイやCAVEによる特殊映像ディスプレイ環境を中心とした作品が多いことも否定できない。将来的にVirtools等のVR世界の構築やデバイス制御を簡易に行うシステム、開発環境の普及が進めば、よりVRアート作品はその幅を持つことであろう。

またCAVE等の特殊映像ディスプレイ環境に依存しないVRアート作品として、インタラクティブアート、メディアアート、テクノロジーアートといった作品群が挙げられるが、これは次節の「エンタテイメントシステム」と関連させて紹介する。

## 1.5 エンタテイメントシステム

### 1.5.1 基本概念

これまで、研究背景として理解するべき「遊びの科学的研究」、「バーチャルリアリティ」について、その歴史、基本概念、技術動向、関連研究について概説を述べた。特に「遊び」については、その『多義性』と『自己目的性』から、本論文におけるその用語定義について、カイヨワの提案した「遊びの形式特徴」から、「遊び」が成立する条件とともに定めた。

ここまで、背景として理解すべき「遊び」の科学的研究とその歴史について紹介するとともに、特に「遊び」について、その『多義性』と『自己目的性』から、本論文におけるその用語定義について、カイヨワの提案した「遊びの形式特徴」から、「遊び」が成立する条件とともに定めた。本章では『エンタテイメントシステム (entertainment system)』についても、その基本概念の定義を行いたい。

「エンタテイメントシステム」という言葉によって扱われる範疇は広い。「entertainment」とは既に述べたとおり、余興や娯楽、接待といった遊びや楽しみの物的要素を広く示す語である。また「system」という語は『個々の要素が有機的に組み合わされた、まとまりをもつ「系」』という意味であり、必ずしもコンピュータシステムに限らない。よって「system」の語の範囲によって、コンピュータによるエンタテイメントシステムである「狭義の」エンタテイメントシステムと、必ずしもコンピュータによって構築されない「広義の」エンタテイメントシステムが定義できるが、その範囲のみの問題ともいえる。

そこで「遊び」の定義で挙げた6つの条件を満たし、遊戯者が自発的に「遊戯状態」を保てるよう設計されたシステムを「エンタテイメントシステム」と呼ぶこととする。言い換えれば、エンタテイメントシステムは人々が効率よく「遊戯状態」が維持できるよう、目的を持ったシステムであるともいえる。より詳説するために図解すると図1.7で表現できる。

まずエンタテイメントシステムには遊戯中の体験者、すなわち遊戯者(Player)に対して「自由、隔離、規則、無利益、虚構」が維持されている必要がある。これらは前節の「遊び」の特性をもとに、よりシンプルな要素として整理しなおしたもので、

- (1) 「自由」強制されない、展開が選べる、いつでも止められること。
- (2) 「隔離」時間、場所において、日常生活と隔たりがあること。
- (3) 「規則」遊びの世界を支える絶対的な法則であり、守られる必要がある(ただし現実世界の法規は停止する事がある)。
- (4) 「無利益」現実世界に利益や生産物を発生させないこと(財の移動はありえる)。

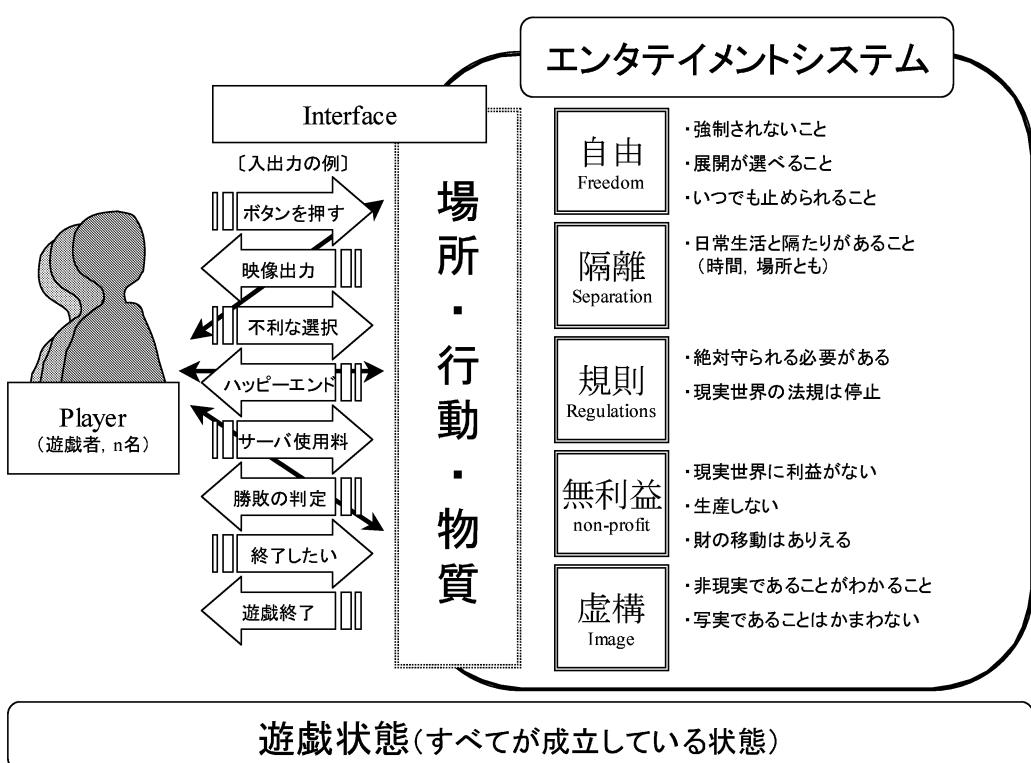


図 1.7 本論文におけるエンタテイメントシステムの定義

(5) 「虚構」写実的でもよいが、非現実であることがわかること。

と再定義される。実際の実装上では、システムと遊戯者の間において、

- 「場所」
- 「行動」
- 「物体」

といった界面と接点が設けられる。コントローラによる電気的信号の入力や、バーチャル世界内での「行動」が想定されるが、これは各システムによって具現化、実装が異なる。

### 1.5.2 広義のエンタテイメントシステム

ここで例として、広義のエンタテイメントシステムについて例を挙げて検証してみたい。

「アミューズメントテーマパーク」というエンタテイメントシステムは、「隔離」された「場所」ではあるが、システム内(パーク内)での「行動」は「自由」である。遊戯者はその自発的行為によって、遊びつづけることもできるが、止めることもできるという「自由」も持つ。ただし、「現実」との接点は、利用料の支払いという「規則」があり、費やした時間や金銭に対する「利益」や生産物はまったく存在しない。また万有引力や疲れなどから遊戯者が開放されることはないと、パーク内に限定された「虚構」であることは無意識下であるが理解できる。

また別の例として「競馬運営」についても検証する。そもそも競馬とは軍用馬の改良のために行われた模擬であり「虚構」の競争である。競馬の開催は休日の競馬場内に「隔離」されており、遊戯者はどの馬の勝馬投票券を購入するか「自由」である。着順と倍率によって配当が決定される厳格な「規則」があり、確率の低い勝馬の勝利を当てれば大きな配当金を手に入れることができるが、競馬運営全体においてはあらかじめ控除率(JRAの場合 25%)が設定されており、期待値の上でも競馬場の外に「現実的に利益を持ち出せない」仕組みになっている。以上のように、競馬運営はこの定義における広義のエンタテイメントシステムであることを示すことができるが、どの要素が欠けても「遊戯状態」が保てないことも想像できる。例えば、「規則」に例外を設けたり、遊戯者が賭博行為において、現実の利益を求め「虚構」との区別がつかなくなった時から「遊び」は崩壊し、エンタテイメントシステムはその本来の目的である「遊戯状態を維持する」ことができなくなる<sup>5</sup>。

<sup>5</sup> 競馬騎手や馬主は無報酬ではないが、システムの一部であり、賞金や利益によってその生活を維持させる必要があり定義上問題無い

### 1.5.3 狹義のエンタテイメントシステム

狭義のエンタテイメントシステム、すなわちコンピュータシステムを用いたエンタテイメントシステムについて、ここでは特に近年発展が目覚しい「コンピュータゲームシステム」、「エンタテイメント VR システム」について紹介する。

### 1.5.4 コンピュータゲームシステム

ここまで紹介してきた VR の基盤技術である IPT やリアルタイムシミュレーション技術、HCI 技術は、半導体の処理速度が向上することで、より解像度の高い画像や触覚提示、高度なシミュレーションが実時間で提供可能になってきている。また、応用としても都市設計、医療、アートといった様々な分野で活用が進んでいる。

他方、VR と共に技術を応用している分野に、コンピュータゲームシステムが存在する。古くは家庭用・業務用のテレビゲームシステムであり、ジョイスティックやパッドといった入力インターフェイスから体験者の入力を高速に処理し、テレビモニタを通して、キャラクターやアバタ（コンピュータ世界の中での自分の化身）の振舞いを体験者に実時間でフィードバックする。VR と異なる点は、宇宙からの侵略者や壁打ちテニスといった、必ずしも写実ではない、ゲーム独自の世界を表現し、体験者を暫し間、娯楽の世界に熱中させるのがシステムの主な目的となっている点である。

VR 技術と共に技術基盤を応用しているため、進歩発展においても、近年の半導体処理速度向上により、フォトリアリスティック、高精細な人物表現といったリアルタイム CG 生成技術を中心に、最新の研究成果が製品市場を通して発表されている。エンタテイメント産業において、市場から求められる刺激は、年を追うごとに高度になる傾向がある。CG 技術に限らず、CPU 処理速度の向上から、シミュレーション、人工知能、コンピュータビジョンなどコンピュータサイエンスが活用される例も少なくない。

近年のコンピュータゲームシステムを代表するソニーコンピュータエンタテイメント社「PlayStation2」はこの傾向を象徴的に表している。高速なグラフィックス処理のために特別に開発された専用処理チップである「Graphics Synthesizer」、ベクトル演算に秀でた CPU である「Emotion Engine」といった世界の半導体開発技術を先行する技術に加え、新しい面白さを提供するヒューマンインターフェイスのための汎用性の高い USB(Universal Serial Bus) ポートやネットワークインターフェイスを備えている。

特に HI 技術に注目すれば、感圧素子が実装されたアナログジョイパッドである「DUAL-SHOCK2」[36] の標準搭載や、「GT Force」[35] のような高度なフォースフィードバック技術を実現したハンドル形コントローラの発売など、力覚フィードバックや高次元入力など、従来ゲームプラットフォームでは高価で普及が難しかったインターフェイスデバイスが、全世

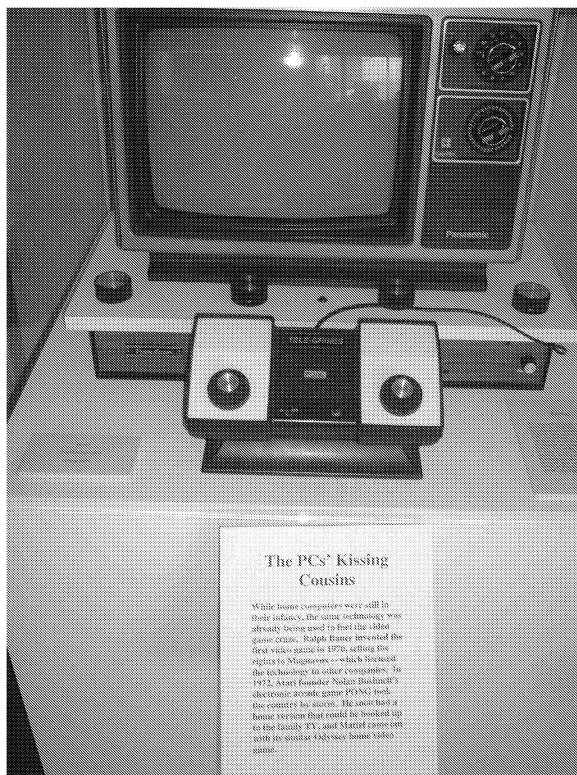


図 1.8 テレビゲームシステム黎明期の代表作「PONG」(米 ATARI 社,1972)

界・数万台規模で製造販売される「PlayStation2」のようなプラットフォームの一般化により、結果として HCI 技術の普及、民生化に大きく貢献しているといえよう。



図 1.9 「GT Force」と「DUALSHOCK2」

### 1.5.5 エンタテイメント VR システム

家庭用コンピュータゲームの進歩めざましいが、他にも業務用コンピュータゲームシステムの発展形ともいえる、立体ディスプレイや大画面ディスプレイといった IPT と HCI 技術を応用した、中型～大型のエンタテイメントシステムは、ゲームセンター施設やアトラクションテーマパークといった設営式の業務用エンタテイメントシステムとして研究開発、普及が進んでいる。本論文ではこれらを「エンタテイメント VR システム」として紹介する。

セガ社は 1985 年から「体感ゲーム」として、エンタテイメント VR システムを開発してきた。特に 1995 年頃よりエンタテイメント VR 技術を主力としたアトラクションテーマパーク施設「ジョイポリス」を展開し、国産初のモーションベースによる多人数体験型システム「AS-1」や CAVE 型 IPT による 2 名同時体験システム「CRYPT」、比較的狭い設置面積でも空中遊泳が体験できるシステム「SKY CRUISING」等、数多くの業務用エンタテイメント VR システムを提供してきた。

これらは産業面での VR 技術のエンタテイメント応用であるが、学際的研究分野ではここ数年「エンタテイメント VR」について特に注目されるようになってきている。エンタテイメントシステムを主な応用先とした VR 技術に関して特に深く研究する分野であるが、これまで紹介した「遊び」研究の源流や、VR の原理的定義を鑑みるとお互いに近い要素を共有

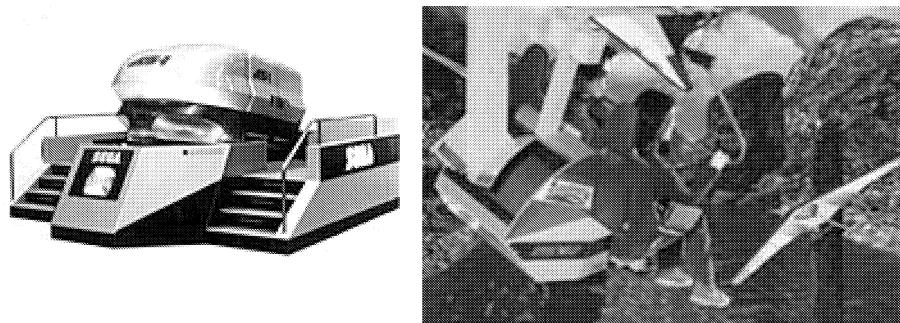


図 1.10 「AS-1」と「SKY CRUISING」

しており、また、昨今のエンタテイメント産業の市場の広がりを鑑みると「エンタテイメント VR」という研究分野が発足するのも不思議ではない。

先に挙げたカイヨワは、『遊びと人間』において「遊びはさまざまな困難の中からあるものを選びとり、それをコンテキストから遊離させ、それをいわば『イレアリゼ(非現実的実現)』するのである」と述べている<sup>6</sup>。VR 技術がその分野を名乗る前から、カイヨワは「遊び」と現実、その非現実的実現について考察をめぐらせていました。「エンタテイメント VR」、すなわち「遊びと VR 技術」に関する話題は興味深いが未整理で混乱を招きやすい分野でもあるので、次節において、より明確にしていきたい。

### 1.5.6 過去に発表した関連システム

前節において、狭義のエンタテイメントシステムの定義と関連システムの紹介を行ったが、本節では、著者がこれまで研究を行ってきたシステムについて紹介する。

#### 「Fantastic Phantom Slipper」

1998 年に SIGGRAPH'98 他にて展示発表を行った、床面利用のエンタテイメントシステムである。遊戯者はスリッパ型のインターフェイスを履き、プロジェクタで床面半ドーム型スクリーンに投影されたサイバースペースを直接歩いて遊ぶことができる。スリッパには赤外線 LED が左右 2 点づつ実装されており、2 次元 PSD カメラを用いて高速にベクトル動作検出を行うことができる。また靴底には携帯電話用バイブルータが左右 2 点ずつ実装されて

<sup>6</sup>イレアリゼとは,ir-realiser と書き、訳注によるとカイヨワの新用法。realiser は現実化、よって「非現実的実現」という意味になる

おり、皮膚感覚における知覚現象であるファントムセンセーションを用いて、方向、距離、強さといった多次元的振動刺激を提示することができる。提示コンテンツは、足裏におけるファントムセンセーションを教示的に体験できるコンテンツ、スクリーン外から近づいてくるA.I.キャラクタの気配をファントムセンセーションを用いて感じ取り踏んで攻撃するコンテンツ、足のみの操作によって空中遊泳ができるコンテンツなどを用意し、歩いて各コンテンツ間のリンクを辿る事ができる。ダンスゲームブーム以前であったこともあり、国籍を問わず多くの体験者が、目と手に依存しない「体を動かす遊び」の面白さに体験をもって興じた[17, 18]。制作当時、本稿におけるエンタテイメントシステムの要素については、全く

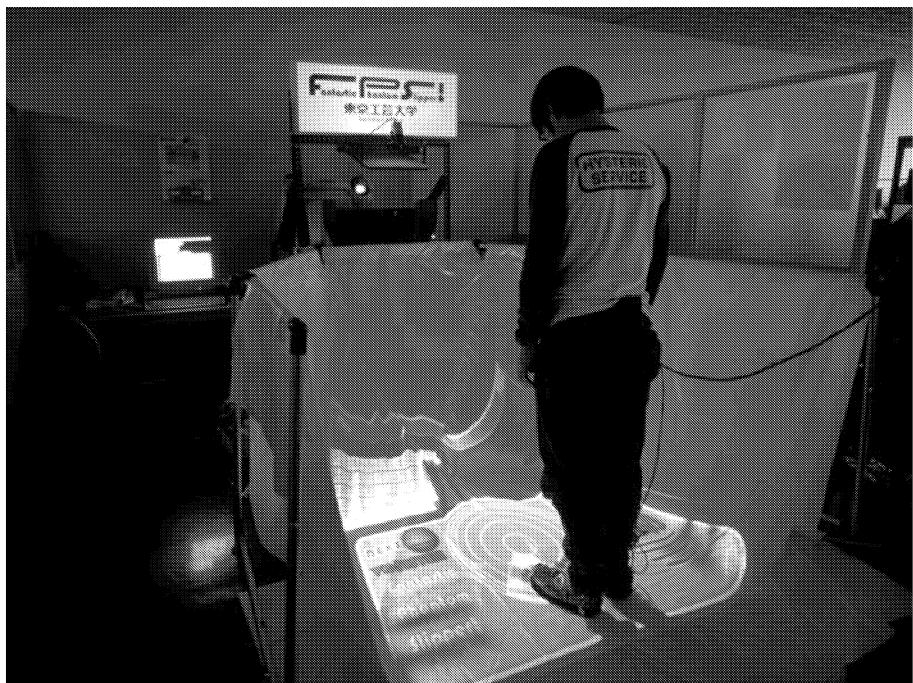


図 1.11 「Fantastic Phantom Slipper」

考査していなかったが、設計パラメータを変更することでどのように「面白さ」が向上するかについては、試行錯誤を繰り返していた。以下は、経験と主観による試行の記録である。

A.I.キャラクタを導入する以前「床面にパネルのような教示をし、それを踏むことでダンスが踊れる」という設計を検討していたが、これは自由度が非常に低く「踊って楽しむ感覚」ではなく、「システムに踊らされている感覚」を覚えた。また、A.I.キャラクタの動作アルゴリズムにおいても、当初はランダムを採用していたが、皮膚刺激に対する乱数を用いた急激

な変化は不快な感覚であり、最終的には加速度と三角関数を用いた円運動を基本としたアルゴリズムに変更した。

また数種類のコンテンツを用意する上で、映像の背景が動かないよう基本的な視線ベクトルは固定とした。ただし「空中浮遊」は足位置から視点位置を算出し、それをもとに3次元視点を生成し「空を飛んでいるような演出」を狙ったが、これはカイヨワの要素における「Ilinx(眩暈)」の強化といえよう。

### 「the Labyrinth Walker」

2002年のSIGGRAPH 2002 Emerging Technologiesにて発表したデモンストレーション作品で、広視野床面スクリーンと動力つきターンテーブルによる構成で、体験者が一切の装着物なしに、バーチャルな迷路の世界を歩き続けることができる。床面に投影されたプロジェクタ映像の上で足踏み動作をすると、床に埋め込まれた工業用ターンテーブルに内蔵された4つの感圧センサーが体験者の重心動搖を検出し、歩行によるステップとして認識する。また歩行の進行方向を推定し、体験者が気がつかないようにターンテーブルを回転させ、遊戯者をシステム正面を向かせ続けることができる。全く装着物なしに、無限かつ自由な方向に歩き続けることのできる没入感覚の高いエンタテイメントシステムである。

この『ラビリンス・ウォーカー』において、遊戯者は「歩行すること」しかできない。展示用コンテンツとして「草原」「無限迷路」「蟻地獄」の三層に分かれた世界を提示し、各層に存在する穴から落下することで別の層に行くことができる。蟻地獄の穴は草原につながっているので、遊戯者は無限に迷路の世界を彷徨い続けるという設計である。

なお同時期に同研究グループにおいて、同様の歩行インタフェイスを用いたエンタテイメントシステムとして『vRoadRunner』が開発・発表されたが、これはレーザポインタを手にもち、弾を発射することができる。また映像面は壁面で、ターンテーブルを傾斜させることによる緩斜面の表現なども実装されていたが、両作品とも複雑性は異なれどエンタテイメントシステムが成立していた。提案したエンタテイメントシステムの定義に沿って考察すると、装着物がなく、歩行によって自由に世界を動くことができるため非常に「自由」度が高い。「規則」は床方向への落下と衝突のみであるが、一貫して守られる法則である。また遊戯者を導く「エサのようなもの」がなくても多くの遊戯者は「無利益」の迷路を延々と歩きつづける。このシステムにおいて「遊戯状態」を阻害するケースは「隔離」と「虚構」を欠損したケースであると考える。現実と虚構を「隔離」する装着物が全くないばかりか、「足踏み」という「虚構の歩行」ができず、床面スクリーンを踏み抜くケースが数名（全体の1割以下であるが）観察できた。

カイヨワの要素における分類では「Mimicry(模擬)」と「Ilinx(眩暈)」の要素が強いといえよう。特に、当初設計になかった「穴に落ちる」という機能を加える前は、写実的な実写



図 1.12 「the Labyrinth Walker」

ベーステクスチャによる迷路の表現はまさしく「模擬」であったが、落下して他の世界に移動できるような設計にしてからは「眩暈」の要素を楽しむ意見が多く聞かれた(ただし、広視野没入映像による「酔い」を訴える遊戯者もいた)。「秩序による極」は Paidia のようでいて、実際には細かな歩行動作を認識させることが難しく「相手のいない Ludos」に近いと考える。[61]

### 1.5.7 アートとの境界

エンタテイメントシステムの定義に沿って 2 作品を考察したが、前述のメディアアート、テクノロジーアートといったアート系インタラクティブシステムについても検証されるべきであろう。ここでは検証を簡潔にするために、後に提案する「Tangible Playroom」と同様のハードウェアを用いつつ、制作意図の異なるアート作品として制作された「Dynamo」2 作を例として挙げる。

#### 「Dynamo:触れる俳句」

「Dynamo」は、3 自由度の空間入力・触覚提示装置である「デスクトップ版 SPIDAR」を基盤に創られた作品である。ソフトウェアを含め「Tangible Playroom」と共通の技術を多く用いており、ディスプレイは底面に設置されているが、そのサイズは 550mm 立方と比べて小さい。

触覚 VR 世界構築を簡易に創作できる「SPRINGHEAD」というソフトウェアプロジェクトの成果を利用しておらず、コンテンツは基本的にテキストファイルだけで記述可能である。ソフトウェアプロジェクトの検証をふまえた習作として「触れる俳句」は上條慎太郎(東京工芸大学芸術学部映像学科)が中心に制作した。

舞台にはあらかじめ俳句のように五七五の韻を踏んで配置された文字が表示されるが、これは各面に一文字づつ五十音のひらがなが表示された立方体の積み木であり、体験者は自由に文字列を壊し、かき混ぜ、配置することができる。舞台より落ちた積み木は、延々と画面上部より滝のように流れ落ちてくる。滝に手を伸ばせば、手に伝わる衝撃とともに、いくつかの積み木を拾い上げることはできる。しかしながら落下運動の速度は非常に速いため、体験者の意のままに拾うことは難しい。

まずこの作品をエンタテイメントシステムの定義から検証すると、体験者に対する「規則」が存在しない。たしかに「ペンギン・ホッケー」と同様、重力や衝突、剛体の運動物理やペナルティ法による反力は実装されているが、体験者(あえて遊戯者と記さない)が実行すべき明確なタスクが存在しない。「自由」度は非常に高いが、俳句を完成させても何かが起

きるわけではない<sup>7</sup>. ただし、積み木崩しや滝に手を入れたときの感触は「興味深い」と感じるようで、これはカイヨワの分類である「Alea(偶然)」や「Mimicry(模擬)」が、アート作品においても表出することを示していると考察できる。

### 「Dynamo:taboo」

「Dynamo:taboo」は著者による「Dynamo」を使った同様のコンテンツであり、精緻にレンダリングされた裸体の平面 CG 映像と、SPIDAR によって接触可能な粗い人体モデルを重ねて提示した作品である。演出として重力と風になびく花弁を配置している。作品は、触覚 VR 環境において、どこまで精緻な人体が表現可能であるか、また体験者がどのような行動を発するか、という興味によって制作された。

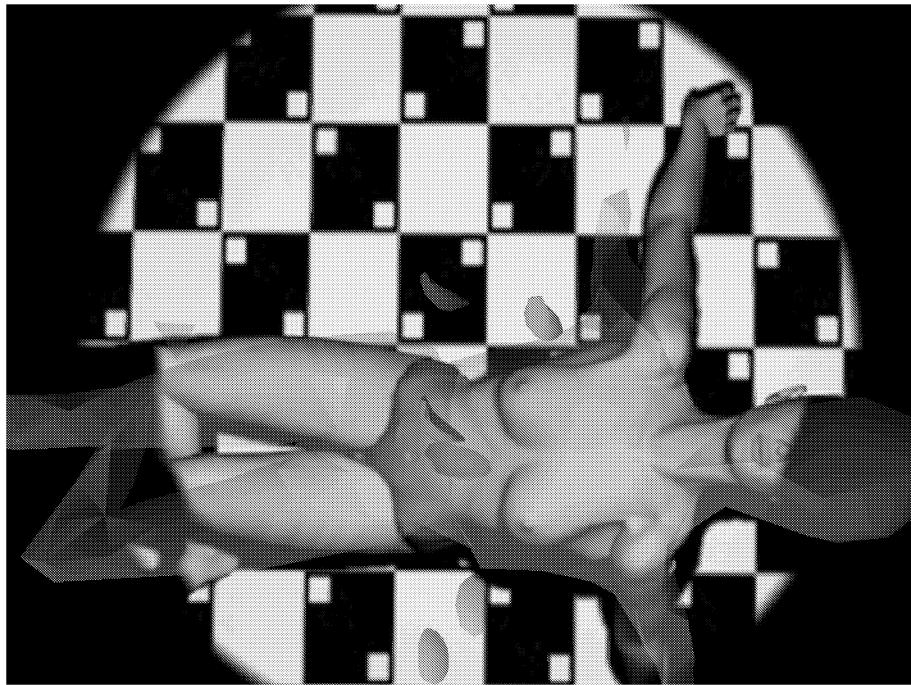


図 1.13 「Dynamo:taboo」

展示を通じた観察では、女性を中心とした多くの観衆は、映像があまりにリアルなためか、タンジブルルグリップの把持すら行わず、ちょっと覗き込んで立ち去り、体験が成立していない様子であった。また係員による「どうぞ触ってみてください」等のナビゲーションを行う

<sup>7</sup>展示を通して多くの体験者から「何か起きるんですか?」との質問を受けたが、言語解析エンジンなどは実装していない。

必要があった。体験時間が長い体験者には中年男性が多く、精緻なモデリングを確認するような行動が観察できた。また、高速化のためにポリゴン数を減らしたため本来の人体と異なる構造についての指摘などを行っていた。

エンタテイメントシステムの定義に沿って考察すると、「Tangible Playroom」と比較して、『何をすべきか』という体験者に対する「規則」と、映像としての「虚構」が足りない為に「遊戯状態」にならないことが推測できる。カイヨワの要素では「Mimicry(模擬)」が強いといえる。仮に、エンタテイメントシステムとして成立させるために「触ること」を明確なタスクとして表現するために、接触時に効果音等の音声を発するよう設計すれば「虚構」としての性質も強まり『楽しい』と感じる体験者も現れるであろう。しかしながら、その設計では「Dynamo:taboo」のアート作品としての作品性は失われてしまうであろう。

### 1.5.8 まとめ

表1.4にこれまでの検証結果をまとめた。提案したエンタテイメントシステムを構成する5要素に対し、主觀ではあるが、その強さを {◎, ○, △, ×} で表現した。

表 1.4 各作品における要素の強さ

作品名	自由	隔離	規則	無利益	虚構
Fantastic Phantom					
Slipper	△	◎	○	△	◎
Labyrinth Walker	◎	△	○	◎	△
Dynamo:触れる俳句	◎	◎	×	◎	○
Dynamo:taboo	○	◎	×	◎	△

「Dynamo」のようにVR技術で構成されたシステムにおいても、コンテンツ上において要素が欠ければエンタテイメントシステムとして成立しないことが読み取れる。

特に「規則」と「虚構」についてはその違いが明確に現れる。アートとは、特にモダンアートにおいては、自由な表現であることが多いので、鑑賞者である体験者にも「規則」を求めるないという暗黙知があるのかもしれない。また「虚構」については、フォトリアリズムのような、写実の理想を追求するアートが存在することからも、必要条件として成し得ないのでないだろうか。

## 1.6 研究の目的

本研究の目的は、子供向けの「新しい遊び」を提供するエンタテイメントシステムを提案することである。研究の意義を高めるために、その開発、実験、評価を通して、提案システムの価値を客観的に明らかにしていく必要がある。

これまで序論として「遊び」やVRに関する研究の紹介、エンタテイメントシステムの定義と検証を行ってきた。少々冗長になってしまったが、ホイジンガらが唱えたとおり「遊び」に関する研究は、その定義を先ず明らかにしなければ、何について研究を行っているか明確にならない。

次章においてはより具体的に、既存技術をエンタテイメントシステムとして利用する上で問題点を挙げ、実現する上で重視すべき要素について述べ、本論文で提案するハードウェアの特徴と、システム上で再生されるコンテンツの設計方針について述べる。

## 第 2 章

# 床面提示型触覚エンタテイメントシステムの提案

本章では、既存技術を子供向けのエンタテイメントシステムとして利用する上での問題点を挙げ、実現する上で重視すべき要素について述べ、本論文で提案するハードウェアの特徴と、システム上で再生されるコンテンツの設計方針について述べる。

### 2.1 子供とエンタテイメントシステム

序論において述べたとおり、著者は IPT や HCI 技術、触覚力覚提示技術といった VR 技術の応用が、人々に新しい娛樂的刺激を提供しうる事に注目し、実演展示を通して提案を行ってきた。

しかしながら、既存のエンタテイメント VR システムの多くは、その遊戯者において制限があるのではないだろうか。特に年齢層について注目すれば「東京ジョイポリス」の主な入場者は中高生～20 代であり、「子供」である 12 歳以下ではない。

特に「子供向け VR」として開発、発表されたものでは、従来から博物館展示やエデュテインメント (Edutainment; Education+Entertainment, 教育と娯楽の複合語) 分野を中心に存在している。しかしながら、その多くは HMD や立体視用メガネを装着し、あらかじめ決められたストーリーを観賞する「VR シアター」の類である。これらのシステムで必要とされるメガネ等の装着物は、必ずしも子供にとって適したものではないばかりか、コンテンツ面においても、あらかじめ定められたストーリーの一部に選択肢があるのみで、インタラクティブ性 (エンタテイメントシステムの定義における「展開の自由」) が高い設計がされている

とはいえない。

そこで本研究では予備調査として、子供、特に12歳以下から～幼児(3～5歳)の遊戯者にとって適したエンタテイメントVRシステムとはどのようなものであるか、検討を行った。

### 2.1.1 幼稚園における観察

幼稚園(幼児;3～5歳)においてその遊戯行動を観察したところ、多くは運動場を走り回るような遊戯と、砂場で造形を行うような遊び、4～5歳の子供は、加えて「はないいちもんめ」のようにルールを持った遊びが主であるようであった(これはピアジェの「遊びの段階説」とも一致する)。また序論で触れたとおり、遊びの基本行動としてその自己目的性が観察でき、必ずしも走って移動することに目的があつたり、具体的な形状を構築することが目的あつたりするわけではないようであった。また、遊び以外の幼児教育においても、かけっこや、はさみ、粘土といった、運動機能を用いた学習と、道具使用を用いた学習が多く用意されているようであった。

また幼稚園に勤務する保育士の方々に対し、エンタテイメントシステムと幼児の接点についてインタビューを行った。特にテレビゲーム等について、その興味の発生は4～5歳児からが顕著であり、3歳児の多くは興味を持たない。きっかけの多くは、年上の兄弟がいる子供からの社会的伝播が主な動因になっているようであり、「××ちゃんが○○を買ってもらった」という発言で購入を要求する。自発的に「○○をやりたい」という欲求ではないことが多く、親の教育方針で購入されない子供は、基本的にテレビゲームへの興味をあらわにしないようだ。また新規なエンタテイメントシステムの提案について『皆が平等に遊べるなら賛成』との意見が聞かれた。上手な子供、ルールや攻略法を理解している子供と、それ以外の子供で、その遊びを通して疎外感・劣等感が生まれることが理由に挙げられた。

### 2.1.2 バーチャルバスケットボールにおける検討

同研究グループで1997年に発表されたエンタテイメントVRシステムが「バーチャルバスケットボール」である[37]。張力提示型空間入力インターフェイスであるSPIDARシステムの応用例であるが、大きなSPIDARを使い、力覚提示を使ったバスケットのフリースローを体験することができるエンタテイメントVRシステムといえる。この「バーチャルバスケットボール」を例に、より幅広い層の子供に対し「遊び」を提供するシステムを提供することを検討してみる。

まず「持つ」という要素に注目すべきである。中国語の「玩」「弄」や日本語の「おもちゃ遊び」の一説でも触れたとおり、「手で持つて遊ぶ」という遊びは、遊びの基本であり力覚フィードバック可能なVRシステムを用いる意味がある。しかしながらより低年齢の子供を

対象とする上では、ピアジェの感覚運動遊び (sensorimotor play) の要素の中でも、「走りまわる」といった身体的自由が必要であると思われる。バーチャルバスケットボールはフリースローであり、「持つ」ことは出来ても、自由にフィールドを走り回ることは出来ない。ただしフリースローというルールはシンプルで、比較的低年齢の子供でも理解しやすい。

またシステムのハード面における問題点として、このシステムは遊戯者の身長に対してロバストとはいえない。体験者の身長によっては、スクリーンが見えなかつたり、力覚フィードバックにおける最適な位置に立つことが出来ない。

本論文における「遊び」の定義と照らし合わせると、自由な活動であり、未確定、重力とボールをゴールに入れるという規則がある。また虚構、非生産、隔離された活動といった特徴も満たしている。またカイヨワによる分類では、Alea(偶然)とMimicry(模擬)が強く、また大画面映像を使っているという意味で Ilinx(眩暈)も強いといえる。ひとりで遊ぶため、Agon(競争)の要素は弱く、秩序による極では明確なルールがあるため「Ludos(闘技)」に近いといえる。

## 2.2 重視する要素

前節の検討を踏まえて、より低年齢の体験者を対象としたエンタテイメントシステムを提案する上で、「重視する要素」を以下のように提案する。

- (1) 日常的な遊びの空間で体験できること
- (2) 身体的・直接的なインタラクションの実現
- (3) 法則性のある世界構築

以下に詳細を、他の研究グループによる事例とともに解説する。

### 日常的な遊びの空間で体験できること

ここでの「日常的な遊びの空間」とは『子供たちが自由に走り回ることが出来る』空間を指す。テレビモニタ上やテーマパーク施設内といった特殊な空間ではなく、実生活と連続な遊戯空間が重要と考える。主に家庭内の生活空間を想定している。

ブラウン管によるTVモニタやLCDによる映像提示は、その広さに限界があり、低年齢の子供における自然な遊びの行動である「自由に走り回ること」が難しい。また遊園地やテーマパーク施設のような特殊環境においても、同様に自由ではない。託児所や子供部屋、体育館のように日常的に走り回って遊ぶことが「afford」されている環境であることが理想である。

このような考え方の先行研究として、適用範囲が限定的ではあるが「PingPongPlus」[45]は、IPT 映像と卓球テーブルを複合させることで、身体的でコミュニケーションのある自然なゲーム空間を、コンピュータによって違和感なく拡張している好例として挙げられる。

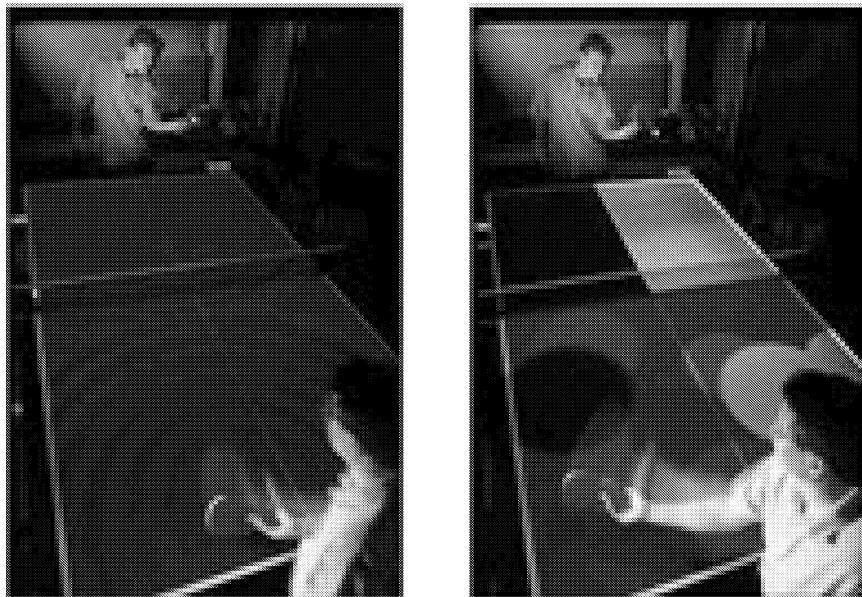


図 2.1 「PingPongPlus」 (MIT,1998)

### 身体的・直接的なインタラクションの実現

提示される空間が日常的であっても、システムとのインタラクションに、言語的な理解やルール、間接的な比喩表現、多数のキャラクタやコマンド入力の使用といった間接的要素が必要な場合、低年齢の体験者がインタラクションを成立させることが難しくなる。これはピアジェの「象徴的遊び (symbolic play)」と「ルールのある遊び (rule play)」がそれぞれ、5歳、7歳以降とされていることからも理解できる。

コンピュータを用いたエンタテイメントシステムはその提示する世界において、何れかの象徴的処理をおこなわなければならないが、「直接的インタラクション」が実現できれば、言語やボタンによる入力の結果をディスプレイから受ける「間接的インタラクション」に対し、感覚運動遊びの延長となり、低年齢の子供にも受け入れやすいはずである。

また直接的インタラクションを身体を用いて実現することが出来れば、その入力とフィード

ドバックの因果関係に同一性があり、システムにおける体験者の試行と経験が、実生活にそのまま応用でき、バーチャルリアリティのメリットをエンタテイメントに応用したものともいえる。

体験者を低年齢の子供に設定し、画像認識による自由な身体的インタラクションを実現した先行研究として「The KidsRoom」[46] が挙げられる。しかしながら、身体を使った non-verbal 入力に対して、画像認識の結果をアニメーションでフィードバックしている点で、間接的インタラクションとなっている。このシステムでは言語理解やストーリー要素が重要になり、体験者の言語や年齢に制限がある。



図 2.2 「KidsRoom」 (MIT,1996)

### 法則性のある世界構築

一般的な体験型エンタテイメントシステムにおいて、勝敗を競う要素(カイヨワの「Ludos(闘技)」)以外の「面白さ」とは、バーチャル世界において発生する事象を、体験しながら理解する過程である事が多い。

本研究で対象としている低年齢層の体験者の入力に対して、システムがランダムな結果を返すことは、Alea(偶然)の要素として遊びを提供でき、開発上も安易であるが、体験としての意味が薄く飽きやすい、また前節のように体験者に対して言語知識や行動選択といった前提となる知識が必要となる HCI 環境は、体験者にとって難易度が高い。

特に低年齢の体験者が体験できる世界の構築することを考えた場合、提示する世界が、複雑な約束事や前提といった事前知識を知ることなく、簡単に体験が開始でき、違和感なく没入できる事が重要である。いくつかの「子供向け VR」とされるインタラクションシステムにおいては、体験者の試行可能な行為を単純化し、理解を容易にする例がある。しかしながら

ら、エンタテイメントシステムとして考えた場合、体験者の行為を限定することは、探索空間複雑性を小さくし「解きやすく、飽きやすいシステム」を構築することになり、トレードオフを生じる。

そこで、体験者の行為を制限するのではなく、構築する VR 世界は可能な限り自由にし、世界を支配する法則として、重力や運動物理といった自然界に存在する法則を積極的に適用する。体験者は日常生活で経験している自然法則に関する知識がそのまま適用できるため、提示された世界に対する前提知識がなくても、VR 世界に没入し自由に行動できる。結果、体験者が理解しやすく、自由度の高い世界を構築できるため、前述のトレードオフを解決することができる。

### 2.2.1 その他の要素

以上の主な 3 つの要素に加えて、安全性や耐久性、映像や音響要素、加えてゲーム中のフィーチャー、判定といったロジックとしての面白さは、従来のゲームシステム等と共に必要な要素であり、またシステムによって、面白さを決定する主要要素や演出的要素であったりするため、本報告では扱わない。提案システムの注目点に比較的関連の高い先例として「Swamped!」[47] や「AlphaWolf」[48] は、ぬいぐるみや音声入力といった子供にも障壁なく操作可能な HCI 技術に加えて、その世界を、人工知能によって行動するキャラクタと印象的な大画面映像を用いて表現している好例として挙げられる。また岩田らの ANOMALOCARIS[52] は、触覚とスクリーンへの投影、人工知能キャラクタを中心としたメディアアート作品での好例であるが、行動範囲が狭く、体験者もキャラクタも移動はできない。IPT と触覚 VR 環境を同時に応用した、自由に行動可能な家庭用エンタテイメントシステムの前例は少ない。



図 2.3 「Swamped!」 (MIT,1998)

## 2.3 床面提示型触覚エンタテイメントシステムの提案

本論文では、前述した要素を満たす具体的な提案として、床面提示型触覚エンタテイメントシステム「タンジブル・プレイルーム」を提案する。タンジブル・プレイルームは前節で提案した3要素に対して以下のような特徴を持っている(図2.4)。

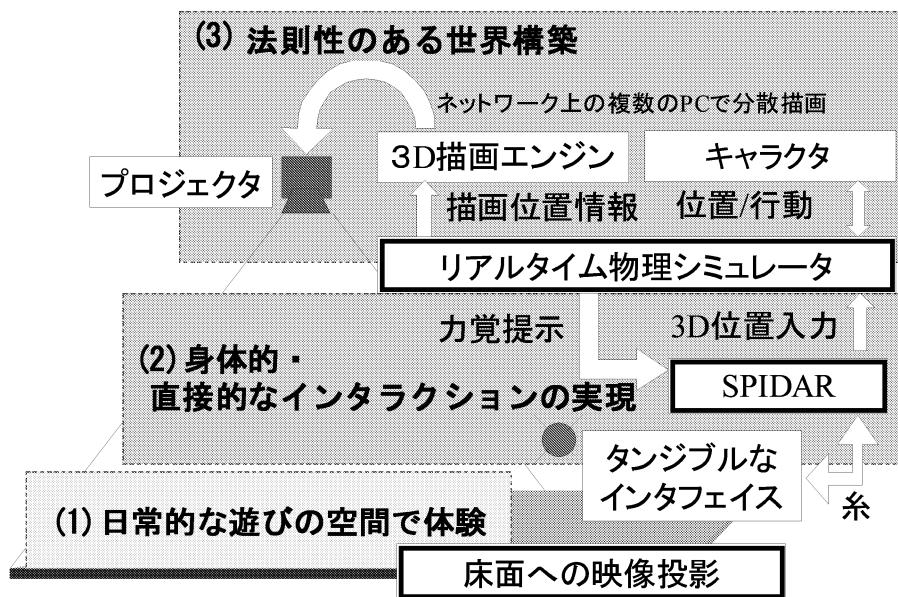


図 2.4 提案要素とシステム構成の対応

前節で提案した「日常的な遊びの空間で体験できること」「身体的・直接的インタラクションの実現」「法則性のある世界構築」といった重視する要素に対し、それぞれ「床面への映像投影」「触覚提示可能な直接的インターフェイス」「物理とキャラクタの運動シミュレータ」という特徴を対応付けるよう設計されている。以下に詳細を説明する。

### 2.3.1 床面への映像投影

子供たちの「外遊び」に注目すると、床面が重要な構成要素となっている場合が多い。例えば『影踏み』、『ドッジボール』、『ケンケン』など、いずれも床もしくは地面が、遊びにおいて重要なプレイフィールドとなっている。この自然で日常的な遊びの空間をコンピュータエンタテイメントによって利用できれば、既存のシステムでは成し得なかった自然で日常的な遊びの空間を提供できる。

本提案では天井から床面にプロジェクタ等を用いた IPT 映像を投影し、体験者が自由に歩行できる広視野映像空間を構築する。特別な大画面スクリーン等を用意しなくても実現可能であるため「日常的な遊びの空間」を簡易に構築することができる。

また、次項の「身体的・直接的インタラクション」の実現においても、スクリーンが床面であることは重要である。既存システムにおいて一般的な前面映像投影方式に比べ、直接提示世界と接触できる上、映像上を歩行する場合も、提示空間と体験者の座標系が相似関係にあるため、対象としている低年齢層の子供にとって前提知識が少なくてすむという利点がある。

### 2.3.2 触覚提示可能な直接的インタフェイス

床面への映像投影により、自由に歩き回り、触れる事の出来る映像空間は提供できたが、コンピュータ制御可能なのは映像のみであり、インタラクションを実現するためにはセンシング技術等を利用し、体験者の情報を取得しなければならない。

木原らの「Moppet」[49]は体育館等の天井に絵が描画できる画像処理を利用したメディアアート作品で、日常的な遊びの空間と身体的インタラクションを実現した好例として挙げられるが、映像提示空間は天井であり、直接触ることができない。画像処理によるインタラクティブシステムは身体性を重視したインタラクションを構築する上で、多人数同時の可能性、耐久性で利点があるが、触知に関しては課題が残る。

藤幡らの「SmallFish」[50]はコントラストの高い布等で包んだ大きな積み木と画像処理を利用して、子供向けの触知可能な身体的インタラクション空間を実現した好例であるが、映像と効果音で表現された魚と積み木を通じた間接的映像インタラクションにとどまり、直接的インタラクションを実現しているとはいえない。SmallFish 体験者の行動を観察すると、配置した積み木を使って魚のキャラクタを囲う行動を示すのみで、コンピュータ生成された魚からのリアクションを映像と効果音以外の知覚で受けることはない。

インタラクションの本質を考えた場合、理想的には、コンピュータからのレスポンスも身体的なレスポンスとして、直接フィードバックされるのが理想である。そのような意味で、触覚力覚インタフェイスを用い、体験者の入出力を身体にフィードバックできることは重要である。

本提案ではそのような観点から、部屋空間全体で触覚提示可能なインタフェイスを実装する。広い範囲で強い力覚と触覚が提示でき、デバイス拘束感がなく、暴走に対する安全性が維持でき、擬似触覚提示ではないという理由から、糸張力式力覚提示装置 SPIDAR で実装する。特に低年齢層の体験者に対する脱着容易性、実物体把持感覚の優位性から、グリップ用球体等の実物体をタンジブルなインタフェイスとした手持型 SPIDAR を使う。



図 2.5 藤幡らの「SmallFish」(2000, 日本科学未来館収蔵)

### 2.3.3 物理とキャラクタの運動シミュレータ

低年齢層の体験者が理解しやすく体験しやすい法則性を、コンピュータによって生成された世界に構築するために、RTS 技術、特に自然界に存在する物理や運動法則を取り入れる。前述の 2 項がハードウェア的特長であるのに対し、本項目は、体験者が体験する環境のソフトウェア技術に注目した要素ともいえる。言語知識や行動選択といった前提知識ではなく、重力や衝突、運動エネルギーの保存則など、自然界に存在する法則の多くは、生活や歩行、遊びといった日常生活の中で体験しているため、自然法則に関する知識がそのまま適用でき、体験者が理解しやすく遊びやすい世界を構築できるはずである。

また自然法則を取り入れることで、前項で述べた身体性と実空間性を生かした入出力ハードウェアによる高度な情報量を、損失なく利用することが出来るという利点もある。

具体的な実装は、提案するコンテンツに依存するが、本論文では特に、構築する法則性について主に「リアルタイム物理シミュレータ」と「キャラクタ」の 2 つに分類することができ、お互いが密接に関係している。

図 2.4 中の「リアルタイム物理シミュレータ」はバーチャル世界中の物理を扱うプログラムである。基本的にはニュートンの運動物理則を想定している。例として、バーチャル世界において、体験者による物体との接触インターフェースを可能にする場合、全ての物体の運動(質量、速度、移動と回転)と衝突(接触判定、部位、めり込み量)をリアルタイムで処理する必要がある。

もうひとつの法則は「キャラクタ」である。コンテンツにキャラクタを使用し、上記のリアルタイム物理シミュレータ内で行動できるようにする場合、物理要素(質量、形状、重心)と判断材料(位置関係と状況)に対して計画(物理的な移動ベクトルの発生)が行える知能的アルゴリズムを準備する必要がある。

### 2.3.4 提案システム外観

前節で提案した要素を満たしたシステム「タンジブル・プレイルーム」の外観イメージを図 2.6 に示す。子供向けエンタテイメントシステムであるので、実験装置的な概観でないことが望ましい。理想的には日常の空間である子供部屋やリビングといった構造物の柱に実装された SPIDAR を用いて実現することが望ましい。

日常的な遊びの空間への実装により、実世界の友達や兄弟と共に、床面に投影された映像上を自由に走り回り、キャラクタとのインターフェースや、物理法則が適用された世界における触覚 VR を利用したゲームコンテンツを楽しむことができる。

既存のエンタテイメントシステムと比較して、大画面と触覚 VR を中心に使い、直感的・直接的インターフェースにより身体を使って、コンピュータで生成された世界で遊べるよう

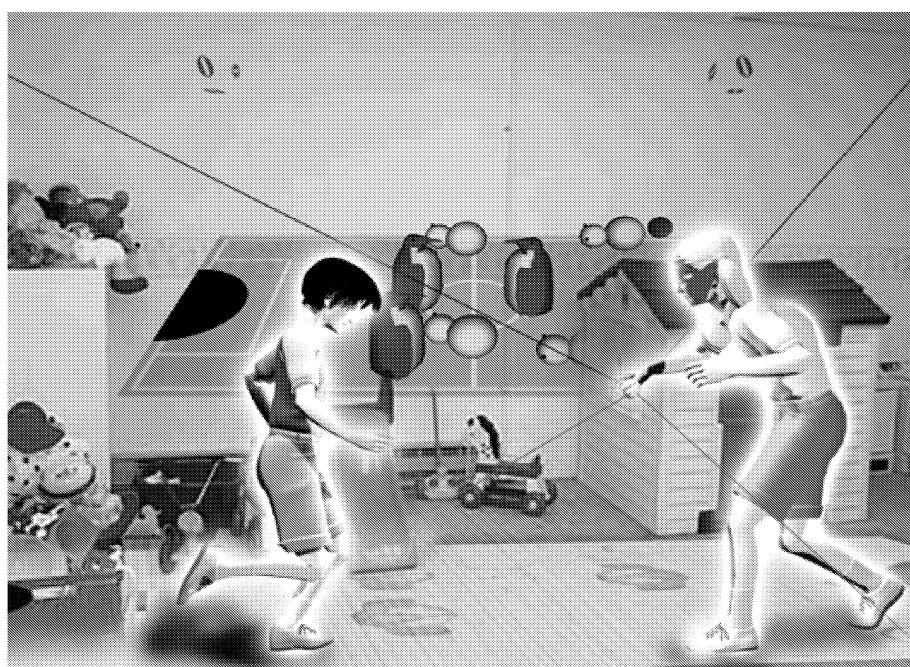


図 2.6 タンジブル・プレイルーム(想定図)

になる事が特徴といえる。システムはハード的に汎用であり、コンテンツが異なっても共通のハードを使用することができる。画面右の女児が把持している直接インタフェイスとなるグリップボールは脱着可能であり、短時間で通常の室内空間に戻せるだけでなく、コンテンツに応じて玩具の飛行機や小型ロボット等に交換することもできる。

### 2.3.5 「Tangible Playroom」という呼称について

触って理解することは英語では「tangible」という専用の語があり、「Perceptible by touch」が第一意、さらに「明白、明確、実質的な」という意味があり、日本語では「触知すること」と訳すことが出来る。

ピアジェの「感覚運動遊び」にあたる、外界認識、運動機能学習といった1歳半～2歳ぐらいまでの遊びの要素を持ちながら、3歳児以降で獲得していく道具使用における様々な接触や試行錯誤を通じた獲得を意識した提案であると同時に、既存のテレビゲームシステムでの発展が顕著な「映像を観るだけ」のような受動的な性質ではなく、能動的に触覚VRを通じて情報を獲得する行為に目を向けたい意図もある。

「playroom」は日本では公民館等の児童施設以外あまり見ることは出来ないが「遊戯室」の意である。子供部屋や託児所といった、「子供が自由に走り回って遊ぶことが出来る室内」を表現する語として採用した。

## 第 3 章

# 提案システムの開発

本章では、提案システム「タンジブル・プレイルーム」の開発について述べる。実際に開発した提案システムについて、提案要素との関連、各デバイス、システムの実装の詳細について述べる。また展示発表を通した実験で用いた代表的コンテンツ「ペンギンホッケー」の開発について報告する。

### 3.1 開発概要

床面提示型触覚エンタテイメントシステム「タンジブル・プレイルーム」は、前章で提案した「日常的な遊びの空間で体験できること」「身体的・直接的インタラクションの実現」「法則性のある世界構築」といった重視する要素に対し、それぞれ「床面への映像投影」「触覚提示可能な直接的インターフェイス」「物理とキャラクタの運動シミュレータ」という特徴を対応付けるよう設計されている。

本節では、それぞれの要素ごとの開発について述べる。なお本研究では実験方法にあわせて、3種類のプロトタイプを製作したのであわせて解説する。

#### 3.1.1 床面への映像投影

プロジェクタを使い、天井方向から床面方向に向けて映像を投影することで、体験者が自由歩行可能な広視野映像空間を構築する。床面への映像投影を実現するために、本研究では4種類の映像投影システムを開発した。

- マルチプロジェクション方式

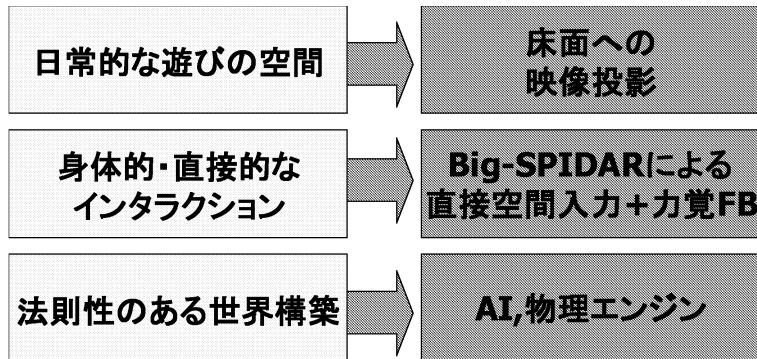


図 3.1 提案要素と実装上の対応

- 天井鏡方式
- モバイルフレーム方式
- デスクトップ方式

理想的な条件を想定すると、体験者が自由に動き回れる空間として 2x3m 程度を想定した場合、使用した一般的な小型軽量プロジェクタである EPSON ELP-7250(1300ANSI ルーメン), PLUS UP-1100(1000ANSI ルーメン) の仕様では、4m 程度の投影距離を必要とする。近年では、非球面レンズや広角レンズ等を用いた特殊な光学系を利用したプロジェクタを用いることで、この投影距離をより短く実現することができるが、本研究では、「マルチプロジェクト方式」として、一般的なプロジェクタを複数同時使用し、出力用のコンピュータをネットワークで同期させることにより、広さとユーザによる遮蔽を改善した。

外骨格を直径 5.5cm の鉄柱で構築し、フレームを幅 2m、奥行 3m、全高 3.3m とした場合のマルチプロジェクト方式の構築例を図 3.2 に示す。前述のプロジェクタを 3 台用い、ネットワークで分散描画することにより実現している。ネットワークによる分散描画は UDP/IP を用いて実装している。全てのコンピュータ上に同一のシーンをあらかじめ用意し、ホストとなるコンピュータが動的な物体のワールド座標における変換行列 (4x4) を UDP のマルチキャストに対して発信する。各クライアントは受信のみを行い、各行列に対応したオブジェクトを適切な位置、角度に移動させ、各クライアントで異なるカメラビュー行列において描画する。この方式は接続クライアント数は可変であるので、図 3.2 では、壁面の 1 台は演出用スクリーンとして利用している。このようなネットワークによるマルチプロジェクトは、1 台あたりの投影距離を短く設定でき、提示映像の上でも、面積を狭く、

輝度を高く保つことが出来る。各クライアントのカメラビューは自由に設定できるので、複数台のプロジェクタを用いて体験者の視界を覆う高い没入感を作り出すと同時に、体験者による影が発生しにくいプロジェクタ配置も構築できるため有効な方式といえる [53, 54]。

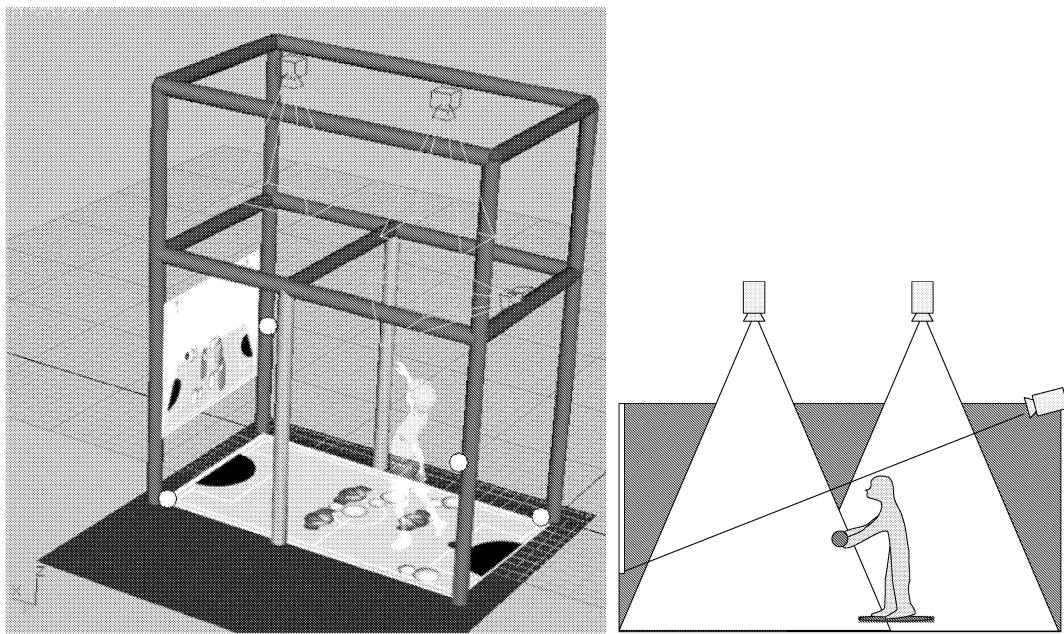


図 3.2 マルチプロジェクション方式

マルチプロジェクション方式はタンジブルプレイルームの理想的な実現方式であるが、一般的とはいえ高価なプロジェクタを数台用い、また大掛かりな鉄骨を利用するため構築に必要な労力が大きい。また天井が低い環境(高さ 2.5m 程度)においては、床面を焦点範囲内に設定することすら難しい。そこで、このような環境のための構築方式として、プラスチックミラー等を木製合板に貼り、フレームと共に天井に設置し、床から天井に向けて映像を投影することで投影距離を適合させる「天井鏡方式」を開発した(図 3.3)。本方式は 2~3 名で構築できる平面、いくつかのデメリットもある。特に、面積の広いプラスチックミラー使用による湾曲、傷等の画質低下と、プロジェクタを遊戯者の近傍に置くことによる衝突の可能性、レンズ、光源を直接覗き込むことによる安全性の面で課題が残る。主に実験室向けの実現方法といえる。

上記 2 方式に加え、海外での発表、外部での実験用に可搬性の高いフレームを開発する必要があったため、直径 25mm スチールパイプ製の 153cm の立方体による「モバイルフレー

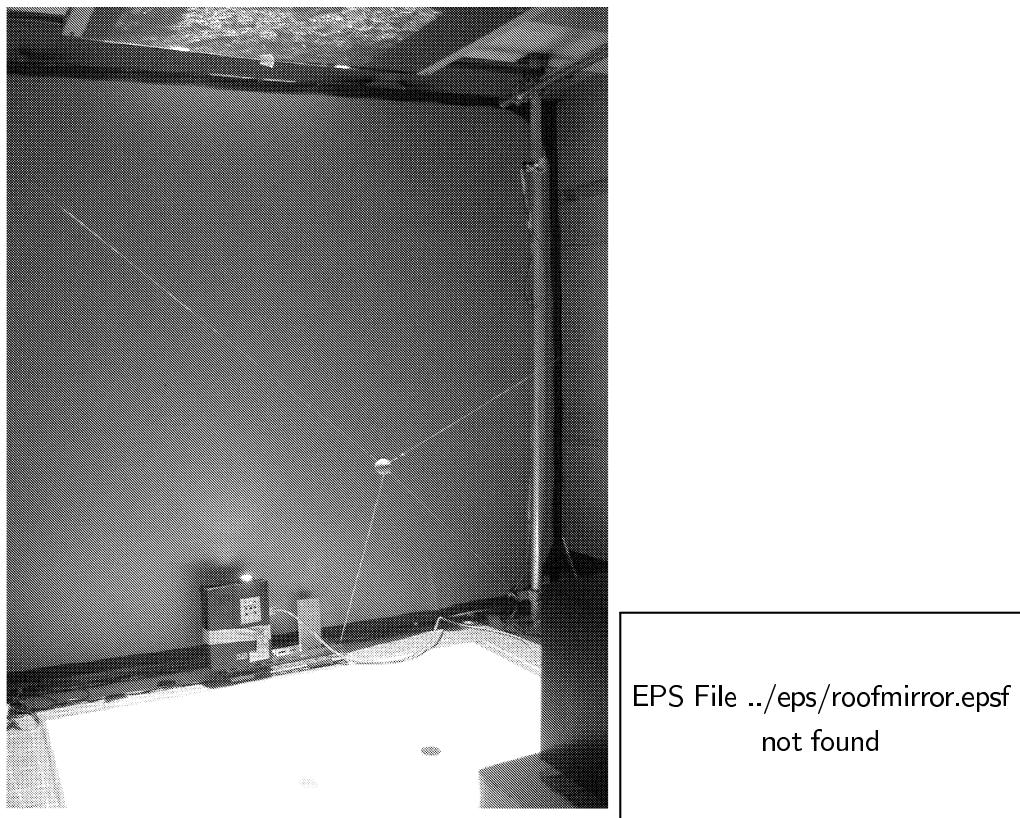


図 3.3 天井鏡方式

ム方式」を開発した(図3.4)。この方式は、筋交いの入った完全な立方体構造になっており、非常に強固である。1辺の長さを153cmとしたことで、対象とする遊戯者の身長を低く、かつ行動範囲を狭く設定することになったが、フレームの強度が高いため、力覚ディスプレイとしての性能は高い。プロジェクタはフレームの上にスチールパイプを延長するか、天井から吊ることで配置する。

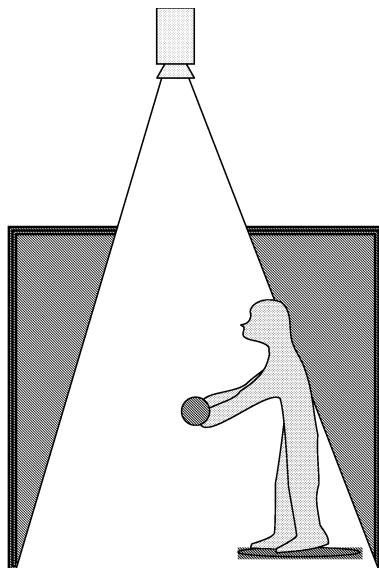


図3.4 モバイルフレーム方式

最後に、これは純粹な「タンジブル・プレイルーム」と呼ぶことは出来ないが「デスクトップ方式」を開発した。これは55cm立方のアルミフレームによって構築されており、構造はモバイルフレーム方式にほぼ等しく、映像は床面ではなく机上に投影される。開発用もしくは小規模な展示用に利用した。

床面スクリーンは白色ポリウレタン等の材質による床緩衝材(一般商品名:パンチマット)を使用する。安価で入手でき、汚れや衝撃にも強い。また体験者が転倒した場合等も、緩衝材であるため、安全面で利点がある。入手が困難な場合、塗装保護や床敷に使われる白色ポリビニルシートをスクリーンとして配置する。いずれの素材にせよ、映像の上を直接歩ける環境を作り出すことが重要である。

### 3.1.2 触覚提示可能な直接的インタフェイス

「身体的・直接的インターラクション」を実現するために、部屋空間全体で触覚提示可能なインターフェイスを実装する。広い範囲で強い力覚と触覚が提示でき、デバイス拘束感がなく、暴走に対する安全性が維持でき、振動提示等の擬似触覚提示ではないという理由から、糸張力式力覚提示装置 SPIDAR を応用して実装した。これは 4 つのエンコーダモータにグリップとして把持可能な物体を利用した部屋空間サイズの入出力インターフェイスで、特に低年齢層の体験者でも脱着が容易、実物体を把持する感覚がある、といった優位点がある<sup>1</sup>。

エンコーダモータは Maxon DC Motor 135079(最大出力 20N)を使用し、インターフェイス部はポリプロピレン製の釣り糸、直径 4cm 程度のコルク製ボール(50 グラム程度)を使用した。空間分解能は 3 軸各 1mm 以上、更新周波数は 500Hz 以上(設定値)とした。

### 3.1.3 物理とキャラクタの運動シミュレータ

「法則性のある世界構築」を実現するために「物理とキャラクタの運動シミュレータ」をソフトウェアで実装する必要がある。提案システムにおいて最低限必要なシミュレータとして想定している要素は、正しい力覚提示とインターラクションを可能にするためのリアルタイム物理シミュレータである。この基本的な触覚を中心とした力学に加え、重力や慣性、衝突といった自然界の運動法則を取り入れ、キャラクタの性格づけ、グラフィックスとの統合、効果音の生成など、表現する世界とコンピュータの演算能力の向上に従って、将来的により複雑になっていくことが予想される。

本研究では本要素の詳細はコンテンツソフトウェアに依存する箇所があるため、次節でコンテンツ開発と関連させて解説する。将来的なコンテンツソフトウェア制作の開発簡便性を考慮しても、リアルタイム物理シミュレータは、映像用のモデルやその他の属性と統合され、汎用的リアルタイム物理シミュレータとしてソフトウェア開発環境として、今後より整理統合されていくべきであるため、Springhead という VR 環境構築用ライブラリを別途開発している [63, 64]。

### 3.1.4 処理の流れ

以下に、処理の流れを解説する。体験者は把持型 SPIDAR のグリップを持ち、映像提示された床スクリーン面を自由に動き回ることが出来る。把持型 SPIDAR のグリップボールに取り付けられた 4 本のワイヤー長の変化量は、それぞれの SPIDAR エンコーダモータの

---

<sup>1</sup>糸張力によって表現できる触覚と力覚の明確な定義について、近年の研究成果の進歩が早く、定性的に述べることが難しい。そのため本論文では将来的に「擬似触覚」として扱われるであろう、対現実での再現性の低い触覚的力覚情報提示についても「触覚」として表現している。

出力値としてメインPCに入力され、高速に3次元位置を求めることが出来る。この位置情報は、リアルタイム物理シミュレータによって処理され、設定された法則性に基づき、バーチャル世界中の物体やキャラクタの衝突や運動を映像や効果音で表現する。バーチャル世界内の体験者のアバタである球体が他の物体と衝突した場合、衝突量を算出し、SPIDAR エンコーダモータの糸張力を通して体験者の手腕に力覚として提示する。

### 3.1.5 プロトタイプの開発

3種類のプロトタイプ開発を通して、いずれの方式も、SPIDAR システムの更新精度を維持できるよう、フレームが強固になるよう構築する必要があった。強度を確認する簡単な目安としては、フレームを構築した状態で人力で揺らし、数センチメートル程度の歪みが発生する状態では SPIDAR は正確な力覚触覚提示ができない。

実際に体験者がグリップを握り、壁などのオブジェクトを提示した場合、エンコーダモータが測定した糸の長さに対する現在位置を算出し、位置に適した出力を糸張力によって提示するが、フレームの歪みが大きい場合、現象として誤った出力を繰り返し、結果として発散、暴走といった現象に陥りやすい。暴走時は過度な力が出力されるため、グリップが予測できない動作をし危険である。ソフトウェアで出力を監視し、暴走を検出する安全機構を実装することは可能であるが、ハード構築時のフレーム精度に対する実際的対策として、最大出力の制限、提示オブジェクトの硬さ係数の制限を設定することを推奨する。

## 3.2 コンテンツ：ペンギンホッケー

ここでは、提案システムの実証実験である、展示発表を通した実験で用いた代表的コンテンツ「ペンギンホッケー」の開発について、その技術情報を報告する。

### 3.2.1 対象として設計した遊戯者

前節に提案した提案システムの実証コンテンツとして、低年齢(3歳以上12歳以下)の体験者をプレイヤとして設定したゲームコンテンツ「ペンギンホッケー」を開発した。実験発表を行うイベントの目的上、心身にハンディキャップを持つ子供でも体験可能なように、特に安全性と難易度に注意して設計を行った。

### 3.2.2 設定ルール

このゲームはアイスホッケーを参考にした2対2のゲームで、フィールド上に存在する4つの「ゆきだるま」を相手側陣地にあるゴール(半円状の穴)に入れると得点になるというシンプルなゲームである。ホッケーの選手となる「ペンギン」は3匹で、相手側2匹、自陣側1匹という配置で、プレイヤがホッケーの選手としてフィールドに加わって遊ぶという設定になっている。

時間制限はなく、ゴールに「ゆきだるま」が入っても頭上(床スクリーンに対して法線方向)より新たに「ゆきだるま」が降ってくるので、プレイヤが希望する限り体験を継続することができる設定となっている。タンジブル・プレイルームの特徴に従い、床面への映像投影、触覚提示可能な直接的インタフェイス、物理とキャラクタの運動シミュレータが効果的に利用されている。以下に詳細を解説する。

### 3.2.3 投影映像

図3.5に床面への投影映像を示す。前節で解説した「ゆきだるま」、「ペンギン」といった登場キャラクタに加え、フィールド上の自分の位置を表すアバタである球形ラケットが図中右に表示されている。アバタの位置情報はSPIDARの位置情報を利用しているため、実空間の位置と一致している。体験中は、体験者の手に重なって表示される。

SPIDARのための触覚力覚情報の処理は高速なサーバマシンで行い、マルチプロジェクトションのために、クライアントとなる各描画PCには共通の描画用モデルデータを用意し、ネットワークには毎フレームごとの全オブジェクトの位置と回転を格納した4x4行列と、効果音などのエフェクト等の表示情報関連情報を送っている。

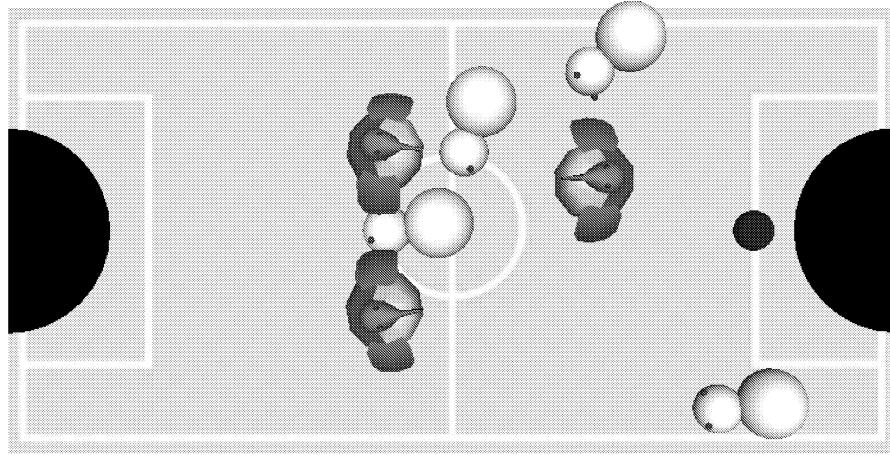


図 3.5 コンテンツ：ペンギンホッケー (床面への投影映像)

### 3.2.4 キャラクタの設定

ゲームに登場するキャラクタは、ホッケー競技におけるパックの役割をする「ゆきだるま」(質量 300g, 全高 320mm) と、プレイヤの対戦相手であり味方でもある「ペンギン」(質量 1500g, 全高 480mm) の 2 種類である (図 3.6).

全てのキャラクタは次節の物理シミュレータに従って運動する。ペンギンのみ物理法則に加えて、知能的アルゴリズムによる移動意思をもついる。これは「興味の対象」と「気の長さ」のパラメータを持ったシンプルなアルゴリズムで、興味の対象 {ゆきだるま 1 ~ 4, ゴール防衛} に対して向かっていく方向に加速するよう、対象物の位置と自分の位置を比較する。「気の長さ」は興味の対象を時間経過によって切り替えるカウンタで、各ペンギンにつき 10~50 秒程度に設定されている。経験による学習は行わない。気が短いほうが、落ち着きがなく、シュートやゴール防衛を達成できない傾向がある。

### 3.2.5 物理モデルの設定

前節のキャラクタは全てリアルタイム物理シミュレータにより、衝突検出、ペナルティ法と剛体の運動方程式に従う。

図 3.6 のように「ゆきだるま」と「ペンギン」は、ともに直径の異なる 2 つの球体が接続された「雪だるま形状」として近似され、それぞれ異なる重心を持っている。プレイヤのアバタや各キャラクタは、運動により、床や壁、それぞれのキャラクタと衝突する。衝突時は

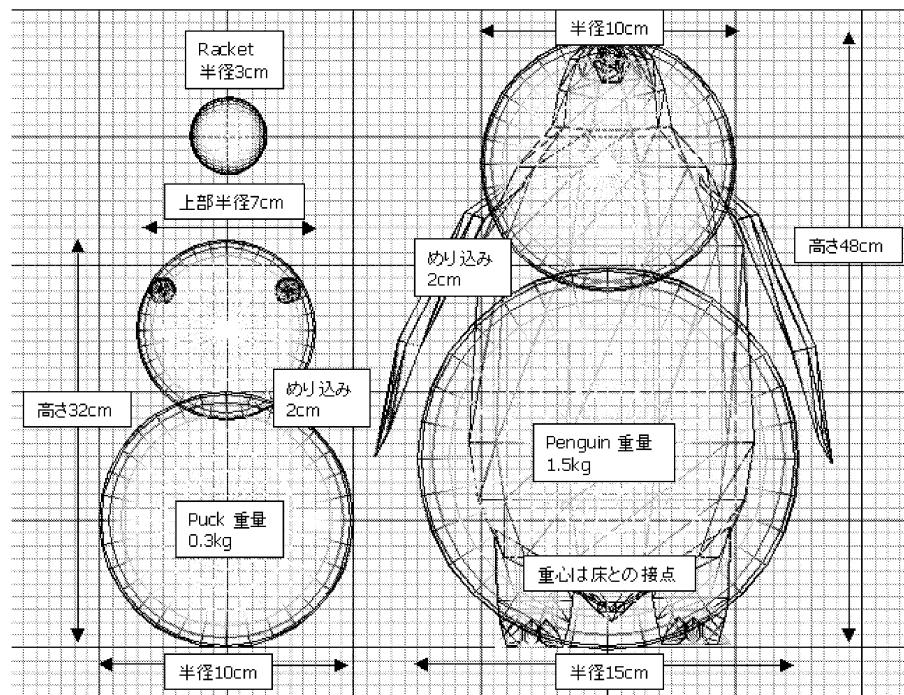


図 3.6 キャラクタデザイン、重さと寸法

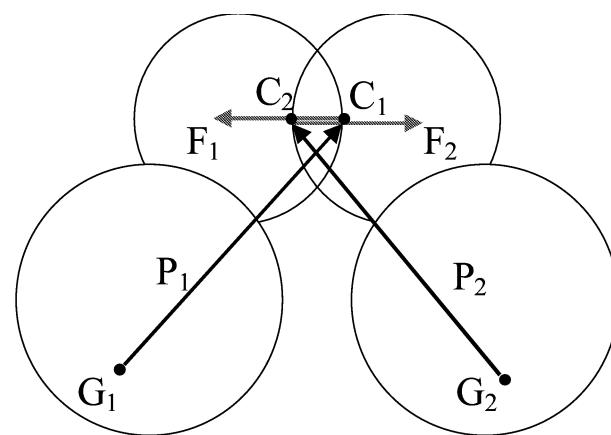


図 3.7 ペナルティ法による衝突量算出

ペナルティ法により処理される。

例として、2つの同じ大きさのゆきだるまが図3.7のような衝突状態にある場合、各オブジェクトは重心( $G_1, G_2$ )を持っており、 $C_1$ と $C_2$ はそれぞれのオブジェクトにおける最侵入点である。 $P_1, P_2$ はオブジェクトの重心からの最侵入点までのベクトルである。運動方程式から、

$$\begin{cases} \mathbf{F} = m\dot{\mathbf{v}} \\ \mathbf{N} = I\ddot{\omega} \end{cases} \quad (3.1)$$

ここで作用点からかかる反力の並進成分を $F_1, F_2$ とおき、回転成分を $N_1, N_2$ とおく。このとき、

$$\begin{cases} \mathbf{F}_1 = (\mathbf{C}_2 - \mathbf{C}_1) \cdot \mathbf{k} \\ \mathbf{F}_2 = (\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_2) \cdot \mathbf{k} \end{cases} \quad (3.2)$$

となる。これで与えられた最侵入点 $C_1, C_2$ とバネ定数 $k$ 、反力 $F_1, F_2$ が算出できる。結果として、下の差分式の通り、 $\Delta t$ 秒後の速度ベクトル $V_i$ と角速度ベクトル $\omega_i$ が求められる。

$$\begin{cases} m_i \mathbf{V}_i(t + \Delta t) = \mathbf{m}_i \mathbf{V}_i + \mathbf{F}_i \cdot \Delta t \\ \mathbf{I}_i(t + \Delta t) \omega_i(t + \Delta t) = \mathbf{I}_i(t) \omega_i(t) + \mathbf{P}_i \times \mathbf{F}_i \cdot \Delta t \end{cases} \quad (3.3)$$

この剛体の運動方程式と、ペナルティ法を基にした衝突物理の運動モデルによって、衝突量に応じた正しい振る舞いを示す運動と、SPIDARを通して体験者に提示するべき力覚フィードバックの方向と量を算出できる[65, 66, 67]。

### 3.2.6 触覚力覚提示

本研究で扱うSPIDARにおいて表現可能な触覚は、主に上記のような力覚提示を通した接触覚であり、一般的には「haptics」と表現される種類の感覚提示である。他方「tactile」と表現される感覚、すなわち表面材質の質感などを提示するためには、今後より精度の高いディスプレイシステムが利用されるべきであろう。しかしながら、本研究では、後進の研究者のためにも、まず剛体の運動物理を基本とした接触覚の表現がエンタテイメントシステムにどのように寄与できるかに注目しておきたい。

今回開発したコンテンツ「ペンギンホッケー」における触覚力覚利用箇所は、遊戯者のグリップと他のオブジェクト(ペンギン、ゆきだるま、床)に対する接触覚のフィードバックである。床面のフィードバックは遊戯者の遊戯空間の知覚、認知を助け、ゆきだるまと、ペンギンとの接触は、その質量差を5倍の質量差を設定することで、ペンギンの重量感を表現

している。また、体験者がペンギンの興味の対象物を遮蔽する位置に立っていた場合、強い力覚でペンギンに押される感覚を知覚できる。これらの演出として利用可能な知覚現象は、既存のVR技術とくに心理物理分野の研究の成果応用や新たな研究分野確立の可能性があり、今後さまざまな展開が期待できる。

### 3.2.7 その他の開発項目

その他の開発項目について付記する。音声に関して、衝突検出時、リアルタイム物理シミュレータから与えられた物体同士のめり込み量はサウンドマネージャに渡され、衝突の強さと衝突キャラクタの種類をパラメータとして、適切なサウンドエフェクトをDirectSoundを用いスピーカから再生する。

他のソフトウェアとして、イベントマネージャを実装した。これはコンテンツ依存のゲームルールやイベントを扱い、得点時の処理やメッセージ処理などを行う。また、初心者、多言語向けのチュートリアルもここで管理している。

システムの周囲で体験するために待っている子供たちも一緒に遊戯に参加できるよう、ネットワークマルチプロジェクトを応用し、演出スクリーンを用意した。ホッケーリングのメインスタンドにあたる位置からフィールドをパースつき視点でレンダリングし投影している。床面映像には表示されない情報として、両チームの得点が表示されており、遊戯者よりも全体的な状況が把握しやすいので、観衆、応援者として遊戯に参加するための映像提示である。

## 3.3 まとめ

本章では、提案システムに関する具体的開発について述べた。提案要素との関連、各デバイス、システムの実装の詳細について述べた。また展示発表を通じた実験で用いた代表的コンテンツ「ペンギンホッケー」の開発についてその技術情報記した。

## 第 4 章

# 提案システムの評価

これまで、提案システムである床面提示型触覚エンタテイメントシステム「タンジブル・プレイルーム」の提案と開発、そのコンテンツについて述べた。このような新しい技術要素を用いたエンタテイメントシステムの提案は、第2章において幾つか紹介したが、その技術要素に対する評価はあまり行われていないようである。本章は「提案システムの評価」として、提案システムを可能な限り客観性のある手法で評価することに主眼を置いた。

### 4.1 エンタテイメントシステムの評価

二瓶らは、小児医療の現場においてVRを用いた臨床例を試みているが、その実験や評価について、以下のように述べている。

VRの子供への応用、影響に関する系統的な研究はほとんどなされていないのが現状である。その理由は先に述べたように、(1)どの程度のVRを持ってVRを用いた実験といえるかということが明らかでない。(2)VR機器の入手が困難であるために臨床医学、臨床心理学の分野まで、VRが普及してこない。(3)子どもを対象とする場合、子どもはじっとしていないので安定した生理的、心理的、神経学的数据を取ることが難しい。(4)小さな子どもは研究の趣旨を理解することが難しいことが多いため、目的に合った研究が困難である。(5)子どもの評価、とりわけ生理的、心理的評価法が確立されていない。(6)子どもは生理的にも心理的にも発達過程にあるために、年齢別の評価をしなければならないこと(年齢別による対象を選択することが困難)。(7)副作用がないと考えられるような場合でも、子どもを対象とする場合は、倫理的な問題をクリアすることが難しい。などが挙げられる[32]。

実際に研究を進めていく過程で同様の課題に直面した。例えば、提案システムは設置後、

簡易に提示コンテンツを変更することができ、そのメンテナンス性も高いが、子供の「自然な遊び」を測定するためには、展示発表等を通し、実際に子供が違和感を感じることなく遊戯状態を保てるような部屋空間を構築する必要があり、実験のターンアラウンドの面では困難を極めた。

そこで本論文では「エンタテイメントシステムとは何か」について、まず序章を用いて定義を行った。これにより「体験者が楽しんでいるかどうか」といった主観的な論議は避けるとともに、対象としているシステムが「遊び」を成立させていくかどうか、つまり既に定義した「遊戯状態にあるかどうか」について着目する。これにより、エンタテイメントシステムの評価を、従来多く行われてきたアンケート等の主観評価中心の評価に加え、遊戯状態を客観的に評価するための測定可能な物理尺度、すなわち体験時間や回数、移動距離といった尺度を加えて評価することができる。

もちろん、本論文で提案した手法が絶対的な遊戯状態を測定できているかどうか、その評価方法についての検証も行っていくべきであると考える。しかしながら、まず新規なエンタテイメントシステムに対する定性的、定量的評価は例がほとんどないため、このような視点で取り組むことは重要であり、また今後、エンタテイメントシステムについて研究を行う後進の研究者に対しても、積み上げになるような事例になると考えている。

#### 4.1.1 展示発表を通した実験

本研究では提案システム「タンジブル・プレイルーム」について、その自然な遊戯状態を測定するため、展示発表を通した実験を行った。一般に行われるようなアンケートによる主観評価、実験者による観察に加え、遊戯者が意識せずにその振舞いを評価できるよう、タンジブルグリップの動作を記録し、その解析を行った。また実験用コンテンツを用いた基礎測定も行った。

研究期間を通して行った展示発表を通した実験は以下の通りである(主要なもののみ)。

- (1) 2001年8月 「福崎バーチャル子供わくわく広場」にて、難病の子供たちのための無料イベントでの展示(初出、マルチプロジェクション方式、PC3台利用)。
- (2) 2001年9月 「日本VR学会第6回大会」にて、VR研究者向け技術展示(デスクトップ方式)[58]。
- (3) 2002年5月 「IWEC2002(International Workshop on Entertainment Computing)」にてエンタテイメント技術研究者向け技術展示(デスクトップ方式)[57]。
- (4) 2002年11月 「東京工業大学すずかけ祭」にて、大学近隣の小学生以下を対象(天井鏡方式)。

- (5) 2003年5月 「東京工業大学すずかけ祭」にて、大学近隣の小学生以下を対象(天井鏡方式).
- (6) 2003年7月 「ACM SIGGRAPH 2003 SIGKIDS (Sandiego,USA)」にて、サンディエゴ市小学生、CG研究者対象(モバイルフレーム方式).
- (7) 2003年11月 「東京工芸大学 インタラクティ部展 2003」にて、小学生～大学生を対象(モバイルフレーム方式).

多くは学園祭等のイベントや、学会といった会場を利用して行い、体験者の全体数、年齢層など異なる展示を通した実験である。序論で述べた定義通り、体験者の自由な行動により「遊び」の状態を定義するので、純粋な「遊び」の状態を測定するために、まず遊び以外の目的、つまり「実験」を目的としていないよう、展示については特に注意を払った。また全ての体験において、被験者である遊戯者には無料で体験させ、特に混雑などしていない限り、時間や回数については自由とした。

提示したコンテンツは「ペンギンホッケー」とし、実験目的によって触覚フィードバックの有無を切り替えることが出来る。また実験者は遊戯者の年齢、体験時間等の記録、安全性の確保を中心とし、体験の補助やシステムの説明、実演などは極力行わないようにした。

#### 4.1.2 実験室における実験

上記の展示を通した不特定多数の体験者を対象とした被験者実験とは別に、基礎特性を測定する目的で、実験室における大学生を対象とした実験、予備測定、同一の子供による複数回の観察実験等を実施した。

## 4.2 アンケートによる主観評価

2001年8月1～7日の7日間にかけて、難病の子供たちのための体験イベント『福崎バーチャル子供わくわく広場』にて実演発表を行った。コンテンツ「ペンギンホッケー」を利用し、実験はアンケートによる主観評価を中心として行った。ハードウェアはマルチプロジェクション方式(PC3台)で、鉄骨によるフレームを構築し、全実験中で最も規模の大きい主観評価実験となった。

#### 4.2.1 設定したアンケート

全ての体験者に対し、体験後に以下のようなアンケートを実施した。

- (1) 氏名・年齢
- (2) 「ペンギンホッケー」は楽しかった？
- (3) ゆきだるまやペンギンにさわれましたか？
- (4) みえないものにさわると、どんなかんじがしましたか？(選択式)
- (5) テレビゲームで、好きなゲームはなんですか？
- (6) うえのゲームよりもおもしろかった？
- (7) このゲームになにかくわえたいことはある？
- (8) またあそびたいですか？

幼児等は保護者や記入担当者によるヒアリングにて実施した。複数回体験した体験者は1件のみ採用した。テレビゲームに関する質問は、既存のコンピュータエンタテイメントシステムと比較するために設問した。

#### 4.2.2 体験者について

7日間を通じた有効なアンケートの全回収数は351名。最年少体験者は1歳、最高齢は57歳であった。年齢層に対する体験者数と質問(2),(8)の回答を表4.1に示す。体験者の年齢層として6～9歳が最も多く、過半数(56.4%)を占めている。男女比は57:42で男児が若干多かった。

#### 4.2.3 コンテンツに対する反応

質問(2)の「『ペンギンホッケー』は楽しかった？」という問い合わせに対しては、ほぼ全体験者が「はい」と回答した(年少の幼児であっても、製作者に対する心遣いが感じられるため、結果としては有効でないと考えている)。「いいえ」と答えた2名のうち、1歳の幼児は、ゲームに対する興味はあるが触覚が理解できていない様子であった。9歳の男児は、質問(4)において触覚を「いやな感じ」と回答していた。「その他」の回答者群には、設問は2択強制選択法にもかかわらず「真中」「ふつう」「わからない」等、中間的回答記述がいくつか見受けられた。この体験者は同時に、質問(4)において触覚を「何も感じない」「判らない」と回答しており、触覚が知覚できていない体験者はコンテンツを楽しめなかつたという傾向が推察できる。

体験者 者の 年齢	合計	体験者数		(質問2) 楽しかった?			(質問8) また遊び たい?
		男	女	「はい」	いいえ	その他	
1	1	1	0	0	1	0	0
2	1	1	0	1	0	0	1
3	11	8	3	11	0	0	9
4	20	12	8	20	0	0	19
5	26	17	9	26	0	0	23
6	51	29	22	51	0	0	47
7	45	22	23	45	0	0	41
8	51	26	25	50	0	1	48
9	51	28	23	47	1	3	47
10	39	28	11	39	0	0	37
11	26	15	11	25	0	1	24
12	4	2	2	4	0	0	4
13	2	2	0	1	0	1	1
18	1	1	0	1	0	0	1
20~	13	10	3	13	0	0	12
無回答	9	0	9	9	0	0	9
合計	351	202	149	343	2	6	323
%	100%	58%	42%	98%	1%	2%	92%

表 4.1 体験者の年齢と感想

#### 4.2.4 触覚力覚に対する反応

表4.2は質問(3),(4)の回答結果を年齢層によって分類した結果である。表中左は「(キャラクタに)さわられた」、右は「見えないものに触るとどんな感じがしましたか」という設問で、触覚に対する印象を「不思議な感じ」、「楽しい感じ」、「いやな感じ」、「何も感じない」、「その他」という選択肢+その他記入式にて回答させた。3歳児以降はほとんどの体験者が触覚を「不思議・楽しい」と回答している。

年齢層が上がるにつれ、「楽しい」よりも「不思議」が多くなり、過半数を占める。「何も感じない」という選択肢は、触覚が知覚できていない場合よりも、多くは無感動、もしくは嗜好に合わない、という感想で、6～9歳児に1割程度みられた。

その他の回答欄では7歳児から「むずかしい」、「すごいかんじ」、「ぶるぶる」、「本当に触っている感じ」、8歳児から「ペンギンがじやまをする」、「すごい」、「引っぱるような感じ」、9歳児から「ふるえた感じ」、「すもうみたい」、「くにやくにや」、10歳児以降からは「動きにくかった」、「引っ張られるようなかんじ」、「すこしやりにくかった」、「しんどい」といった感想が記入された。予め選択肢として設定しなかったが「重い」という感想が8～9歳児に比較的多く見られたので別途集計した。年齢層が上がるにつれ、高い自由度や操作の快適性が求められる傾向があった。

#### 4.2.5 テレビゲームとの比較

表4.3は、質問(5),(6)に関する結果で、既存のテレビゲームとの比較が目的である。左表は質問(5)において「テレビゲームで好きなものは何ですか?」と聞き、回答があった体験者を年齢層ごとにカウントしている。右グラフは「好きなゲームがある」と回答した体験者のみに対して、質問(5)のゲームと比べて、ペンギンホッケーが面白いかどうかを「はい・いいえ」の2択で聞いている。

全体的に体験者のテレビゲーム接触率が高い。3歳以下は母数が少なく、かつ体験者はゲームに強い興味を持った子供である可能性が高いため断定はできないが、近年のテレビゲーム習慣化は4、5歳児からといわれており、一般的な層であると考える。全体では57%にあたる141名が「ペンギンホッケーのほうがすき」と回答した。また、2択式であるにもかかわらず悩んだ末に「どちらも/無回答」とする例が16%程度存在した。各年齢層では、5～11歳までの層に提案システムのアドバンテージがあり、4歳以下や12～18歳では優位とはいえないなかつた。質問(5)におけるテレビゲームに対する嗜好は、高年齢になるにつれ、複雑になる傾向があるが、この層のテレビゲーム嗜好者に対する提案システムの受容は5割と比較的高い。

提案システムとテレビゲームとの比較は、質問(7)の「加えたいもの」に年齢別の反応が

年齢層	キャラクタに さわれた 人 (%)	質問(4) 「(触覚は)どんな感じがしましたか?」						
		不思議	楽しい	いやな	なにも	重い	無回答	その他
1~2	0 ( 0% )	0	0	0	0	0	2	0
3	9 ( 82% )	5	3	0	1	0	2	0
4	18 ( 90% )	4	14	0	0	0	2	0
5	25 ( 96% )	7	14	0	2	0	2	1
6	50 ( 98% )	17	24	0	5	1	2	2
7	37 ( 82% )	14	15	0	5	0	7	4
8	49 ( 96% )	31	8	0	7	2	0	3
9	48 ( 94% )	23	12	2	6	2	0	6
10	38 ( 97% )	24	10	0	1	1	0	3
11	25 ( 96% )	17	5	0	1	0	1	2
12~13	6 ( 100% )	3	2	0	0	0	0	1
18~	14 ( 100% )	8	6	0	0	0	0	0
合計	319 ( 91% )	153	113	2	28	6	18	22

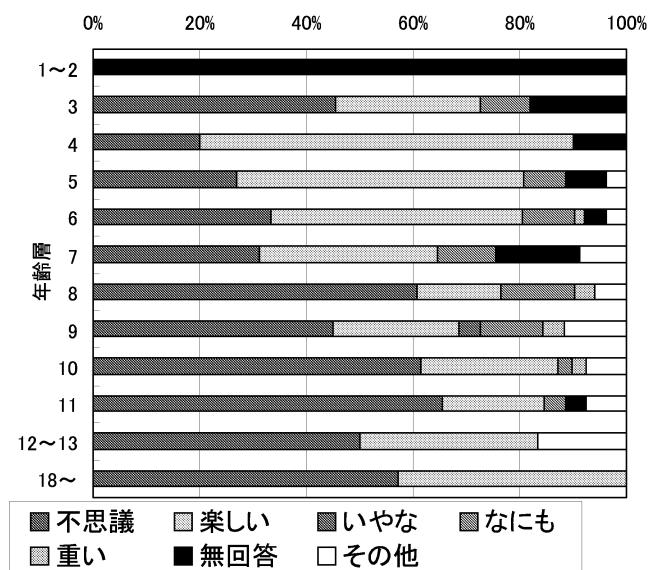


表 4.2 触覚に対する印象 (年齢層別)

うかがえる。記入があつたものでは、4歳児においてグラフィックスや音の多様化に対する要求、5歳児は有名キャラクタの使用と対戦機能、6歳児以降は派手化(数、速度)、暴力化(ペンギンを穴に落とす、武器の追加)、賭博化(景品が欲しい)といった意見が見られた。

#### 4.2.6 年齢に対する触覚の感想の差異について

アンケートによる主観評価から、体験者の年齢に対する触覚反応は差異が認められた。まず、1～2歳児は体験者として成立していない可能性が考えられる。認知科学の研究成果によれば、テレビ画面中の自己映像の認知を調査する「マークテスト」の結果では、4歳児以降で成立するという報告がある[51]。ペンギンホッケーはプレイヤのアバタを触覚提示の他に映像により提示しており、1～2歳児に対して難易度の高い認知タスクを実施しているといえる。3～4歳の幼児から、タンジブル・プレイルームの体験者として成立しうることは確認できた。またこの年齢層では、7歳児以降の「不思議」という感想と異なり、「触覚VRは楽しい」という感想を持つ傾向があるが、実世界における運動学習が成長により進むにつれ、バーチャルな現象に対する理解が変化していることが推察できる。

### 4.3 実験者による観察

#### 4.3.1 体験者の振る舞い

図4.1が体験中の様子である。写真上は9歳女児で、非常に激しく動き回っている。写真下は4歳女児と6歳男児で、座り込みながら、床の映像を撫でるなどして遊んでいる。どちらの被験者も、行動は自由で、SPIDARのグリップボールを直接把持していない体験者も、床スクリーン上の映像を触ったり、指差したりして同時にゲームに参加することが出来ていた。

会期中、心身に何らかのハンディキャップを持った子供が体験する機会があったが、手腕が自由に動かせなくとも、グリップボールを把持したまま、目的物に歩行するだけで充分にゲームシステムを楽しむことが出来ていた。

開発当初、SPIDARのワイヤーの安全性が危惧されたが、ケガやその他の問題は発生しなかった。ほとんどの体験者は、前方だけでなく、側部や後部にグリップボールを持ち替え、無意識的にワイヤーを避けて体験することが出来ていた。

年齢層	好きなTVゲームがある人 (%)	
1~2	2	(100%)
3	3	(27%)
4	13	(65%)
5	20	(77%)
6	36	(71%)
7	31	(69%)
8	37	(73%)
9	38	(75%)
10	35	(90%)
11	22	(85%)
12~13	5	(83%)
18~	4	(29%)
合計	246	(72%)

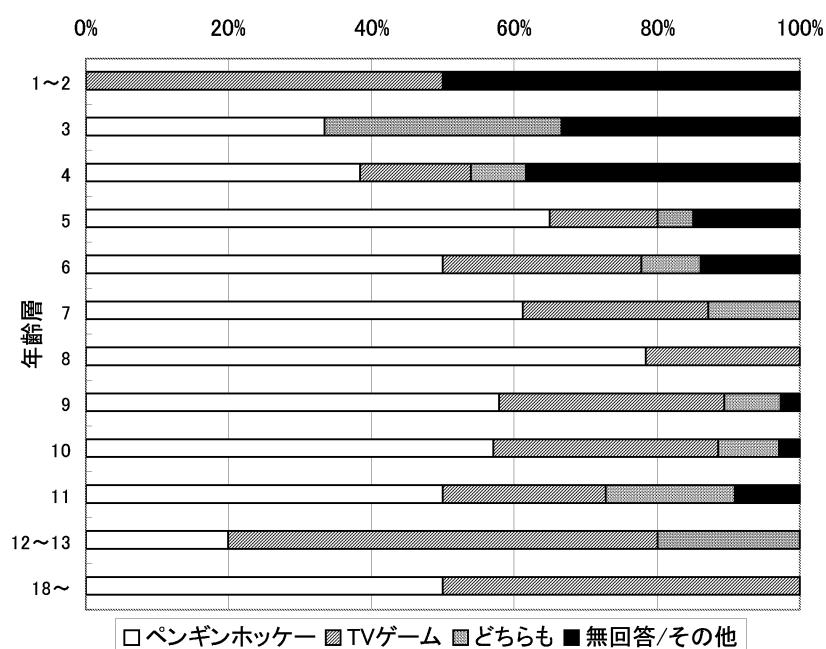


表 4.3 テレビゲームとの比較 (年齢層別)



図 4.1 体験者の様子

### 4.3.2 観察より

運動学習の見地でも興味深い結果が観察できた。ペンギンホッケーの体験中は「物体を目的地に押して運ぶ」といったタスクが多く発生するが、当初最適な方法を充分に理解していない子供が、触覚を頼りに「物体の後ろから押せばよい」という戦略を学習する例が数回見られた。また、同様のタスクにおいて、保護者に手を添えてもらっている体験者、つまり「体験者の手に触覚がフィードバックされない状態」では、試行を繰り返しても学習できないというケースがあった。

一般的に、子供はインタラクティブ性に強い興味を持っている。これは外界に対する試行と結果による体験の繰り返しが、成長において重要な行動である事が理由であると考えるが、タンジブル・プレイルームは従来のテレビゲーム型システムと異なり、視覚や音声に加え、身体運動と触覚についても、同様な環境が提示できているといえる。

以上、提案システムを実際に開発し、不特定多数の体験者に対し、提案システムが受容されることを展示発表によって確認した。

## 4.4 海外における実験

海外にて渡航展示をする必要があったため、モバイル版タンジブル・プレイルームとして153cmの立方体で「軽量版」を構築した。体験者には「グリップを握り、バーチャル世界のキャラクターにさわれる」と伝えるのみで特に明確な目的を伝えず、体験時間の上限を10分程度に設定し自由に体験させた。体験中のSPIDARの入出力と2つのゴールに落ちた「ゆきだるま」の数を記録し、体験後に許可を得られた体験者のみ身長と年齢を記録した。

コンテンツ「ペンギンホッケー」改良版を利用し、2003年7月29~31日の3日間にかけて、アメリカ・サンディエゴで開催されたCGとインタラクティブ技術のための学会「ACM SIGGRAPH」の子供向け応用セッション「SIGKIDS2003」において展示発表を行った。会場はアメリカコンピュータ博物館の一角を利用し、来場者は無料で参加体験することができた。

### 4.4.1 体験者について

3日間の展示を通して、58名の体験者より身長と年齢を取得できた。主な国籍はアメリカ人で、体験者の最少年齢は1歳半、最高年齢は52歳。20歳以下の体験者は33名で、うち平均年齢は9.3歳、平均身長は139cmであった。全体で10名の体験者が2回以上体験し、同一体験者による最高体験回数は6回であった(6歳男児)。

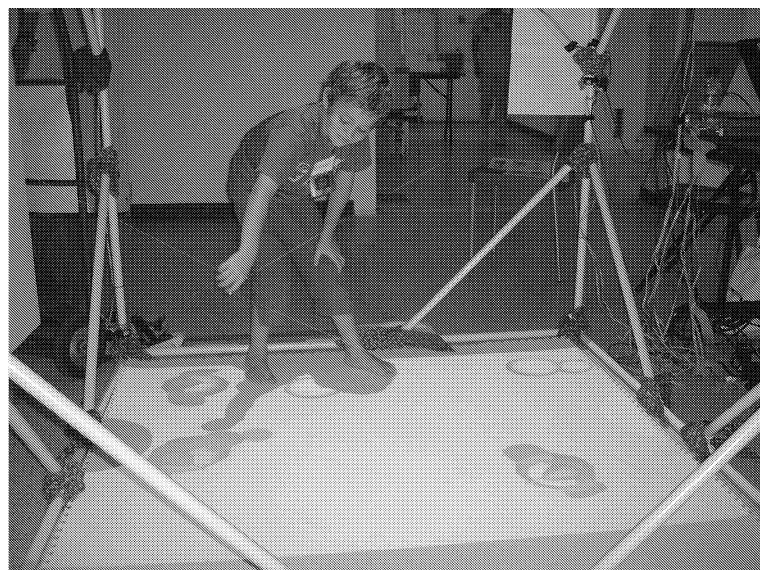


図 4.2 海外での体験者 (6歳男児)

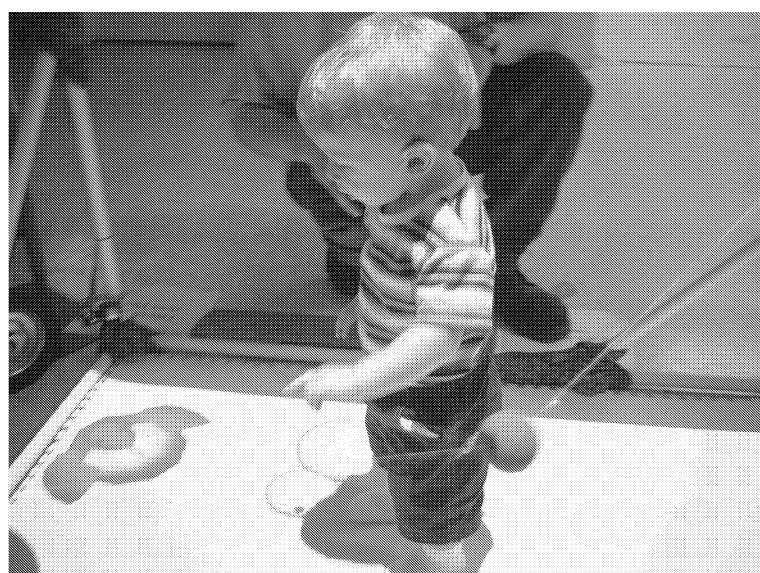


図 4.3 海外での体験者の様子 (1歳半)

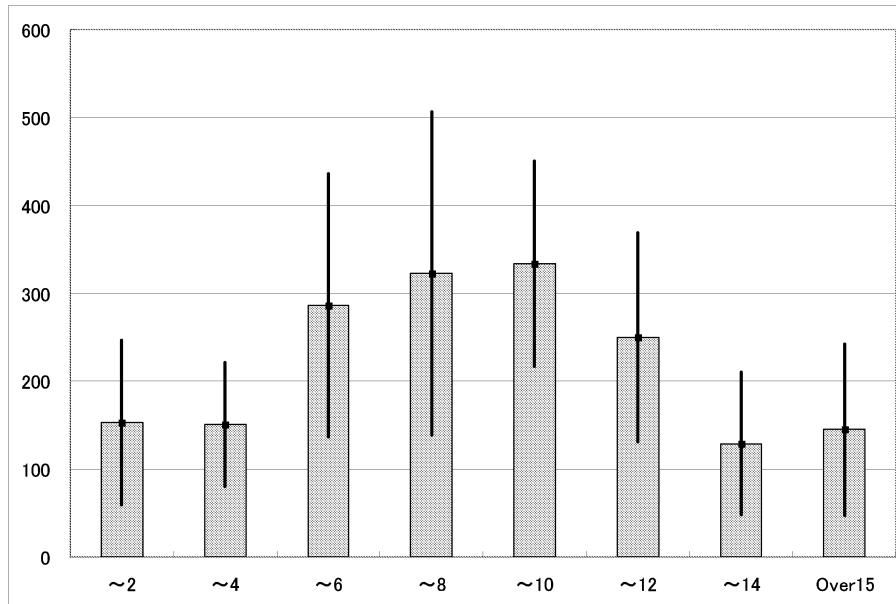


図 4.4 体験者の年齢層と体験時間(海外)

体験時間(秒)と各被験者の分散を縦、年齢を横に2歳ごとで分割し配置している。5歳から10歳が最も高く、初回にもかかわらず5分近く体験が続いている。特に9~10歳が高く平均334秒で15歳以上の平均145秒の倍近い時間体験していることが興味深い。1~4歳はそれほど高くはないが、平均で150秒程度は体験が持続していた。

国内での実験結果と比較して、日本人、アメリカ人とも提案システムを興味の対象として捉える年齢層が9歳前後であることが推定できる。1歳半の体験者(図4.3)は、日本人の場合と同様、映像は認知できており、図中でも指を指しているが、タンジブルグリップと映像との関係が理解できていない様子であった。

#### 4.4.2 自動計測による提案システムの評価

前節で述べたとおり、エンタテイメントシステムの面白さを物理的に評価することは難しいが、体験者の体験時間や行動記録などを基に、物理的な尺度でエンタテイメントシステムの評価が行えることができれば、提案システムの評価を行う上で理想的であるだけでなく、他のエンタテイメントシステムの研究にとっても有益である。

そのような観点から、SPIDARシステムにおいて、体験者の体験開始から終了のタイミ

ングを自動計測するシステムを実装した。予備測定を行い、タンジブルグリップの3次元位置情報とその前測定位置の差分から、把持状態と静止状態を判別できる閾値を測定し、設定した。

海外における展示発表において、上記の方法によって算出した体験者によるタンジブルグリップの把持開始から把持終了までの時間 (msec)，システムからのフォースフィードバック指令値，得点などを 25Hz の周波数で記録しデータベースに格納した。約 120 万件の素データを実験後オフライン処理し、タンジブルグリップの移動速度、把持状態を解析、体験者の状態 {不在、体験中、把持静止中、その他} について機械的に分類し 13,000 件のシーケンスデータとした。データの安全性のために、オペレータによる筆記データと比較し、個々の体験者のプロファイルと関連付けを行った。

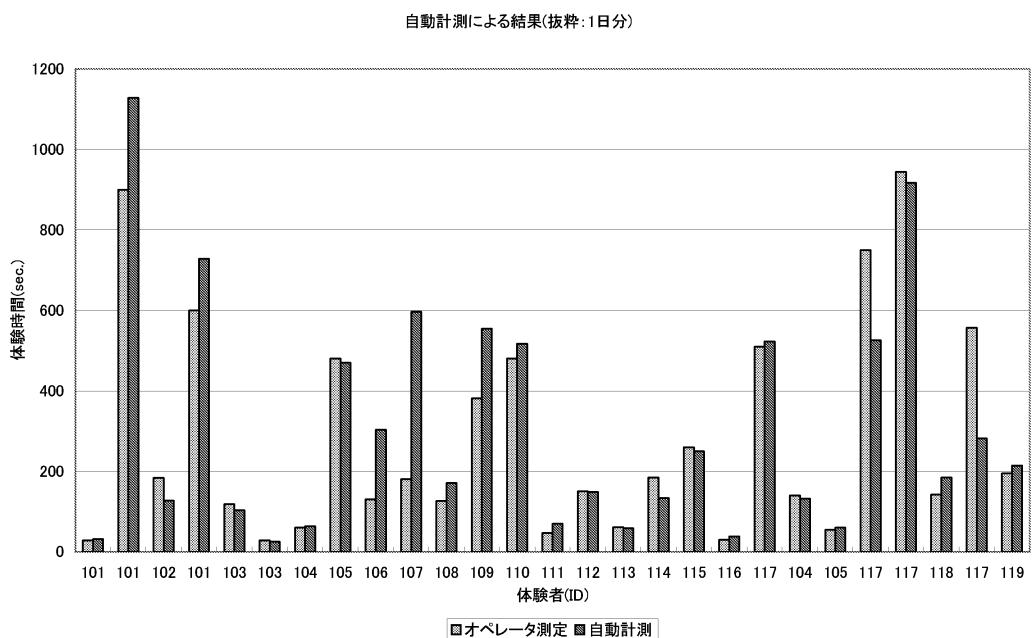


図 4.5 自動計測とオペレータ測定によるシーケンス長の比較

図 4.5 は、自動計測と、オペレータによる筆記とのシーケンス長 (体験時間) の比較である。おむねオペレータによる測定結果と一致している。グリップの移動速度に対して把持状態を推定しているので「把持されていない状態」として判断される「静止した状態近い体験者」で誤検出があるが、筆記データ、ビデオ等の記録と照らし合わせることで、ほぼ問題なく利用できる。またオペレータによる手動測定は全体として短めの時間として記録されて

いるが、これは開始時刻の判断があいまいであることが原因といえる。

#### 4.4.3 触覚の有無に対する体験者の振舞い

前節で示した自動測定によるシーケンスデータを用いて、提案システムにおいて注目した要素「身体的・直接的インタラクションの実現」と、その実装である「触覚提示可能な直接的インターフェイス」について検証評価を行った。海外での展示期間において、意図的に触覚の出力をコントロールした条件で展示を行った。

実験者は体験者に対し、触覚の有無についての情報を告げずに測定を行っている。触覚を出力していない状態では、身体的・直接的インタラクションが行えるが、フィードバックされるのは映像と接触時の効果音のみ、すなわちタンジブルグリップの視覚位置と衝突のみが体験者に返される。

図4.6は前出のシーケンスデータよりもとめた、タンジブルグリップ移動速度(m/sec)のヒストグラムの代表的な例である。触覚なしのデータに比べ、触覚フィードバックを行ったモードのほうが、様々な速度で入力動作を行っていることが確認できる。触覚フィードバックが行われない場合、比較的速い速度の動作が現れる傾向がある。これは、触覚がフィードバックされないことによる空振り動作が影響していると考えられる。

図4.7同様のシーケンスデータから動作軌跡(タンジブルグリップの位置,XYZ)を抽出し、天井方向からプロットしたものの特長的な例である。シーケンス長は触覚なし(22sec)、触覚あり(35sec)とほぼ変わらないが、触覚なしのモードにおける動作領域には大きな偏りが確認できる。

この結果により、触覚ありのモードにおいて、被験者が広い範囲で動き回っていることが類推できるが、この実験方法においては自然な遊びの状態において測定するために、被験者にはタンジブルグリップ以外のセンサ装置を身につけていない。よってこの動作軌跡はタンジブルグリップだけの動作、すなわち手腕の動作を示しているが、記録ビデオの観察では、触覚がある場合のモードが比較的、広い範囲で動き回っているように観察できた。画像処理などを併用し、今後、より詳細な実験を検討したいと考えている。

### 4.5 実験コンテンツを用いた実験

展示発表を通して行った実験では、提示コンテンツとして完成したゲームシステム「ペンギンホッケー」提示した。しかしながら、より詳細な比較のために、完成したゲームシステムではなく、よりシンプルなHCI環境を提示するべきであると考えた。

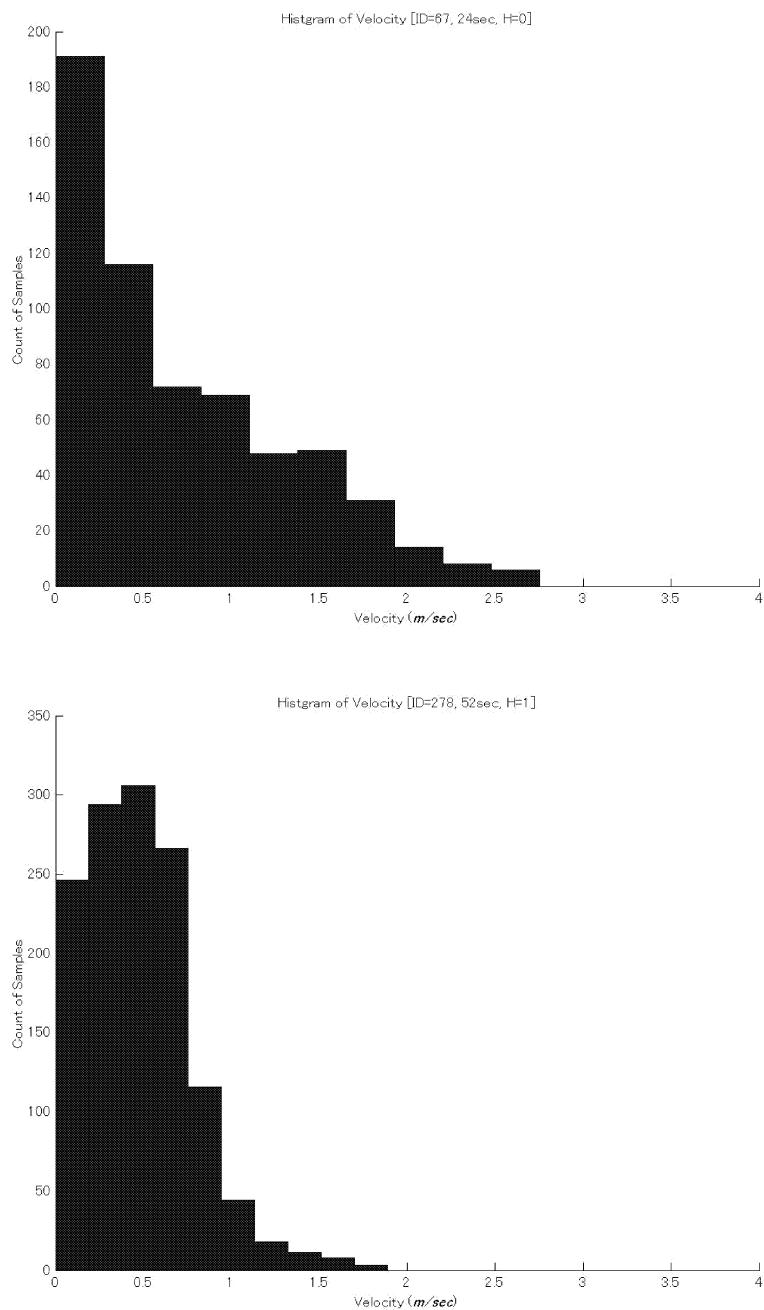


図 4.6 触覚なし(上), 触覚あり(下)

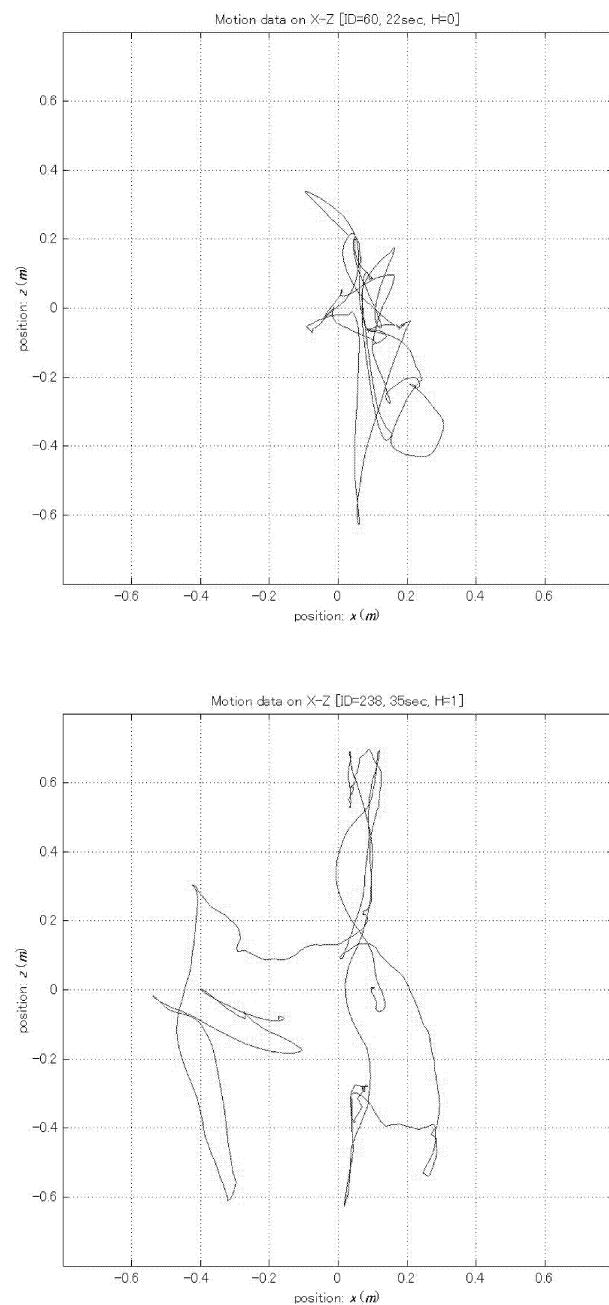


図 4.7 触覚なし(上), 触覚あり(下)

そこで、よりシンプルな実験用コンテンツを開発、提示した。図4.8はそのイメージで、シンプルな床に球体が転がり、タンジブルグリップで接触できるだけ、というシーンである。

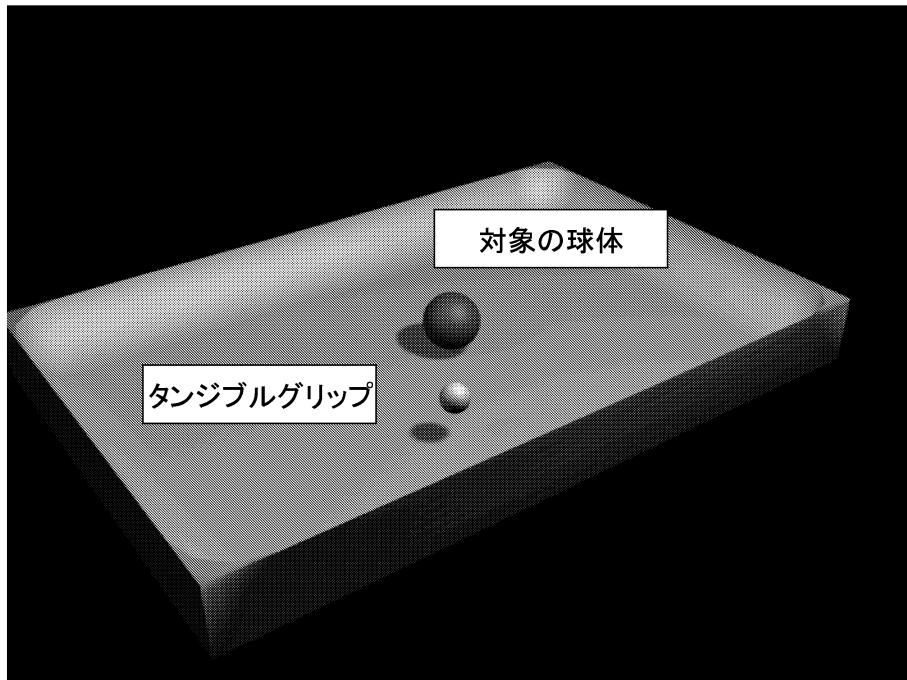


図4.8 実験コンテンツ「床と球」

実際にはさらにシンプルにするため、天井側から並行投影カメラによるレンダリングを行い「円と円」の衝突まで簡素化した。また衝突の物理シミュレータ力学もニュートン力学を基本とした質点系のみ扱い、摩擦や反力もすべてコントロール可能な環境を開発した。

#### 4.5.1 床面ディスプレイに対する評価

タンジブルプレイルームの構成要素のひとつである「床面ディスプレイ」は自然な遊びの空間を提供している。実際の体験者の振舞いを観察すると、日常的な遊びの空間認識との相違が少ないので、直感的なユーザビリティに寄与しているように見える。ここでは、床面と壁面において「円と円」を「一定時間できるだけ多く追従せよ」というタスクを被験者(大学生男子)に実行させた(この実験は遊びの状態ではなくユーザビリティの試験であるためタスクを明確化した)。

図4.9は同一の被験者における、タンジブルグリップの位置情報を記録から、ディスプレ

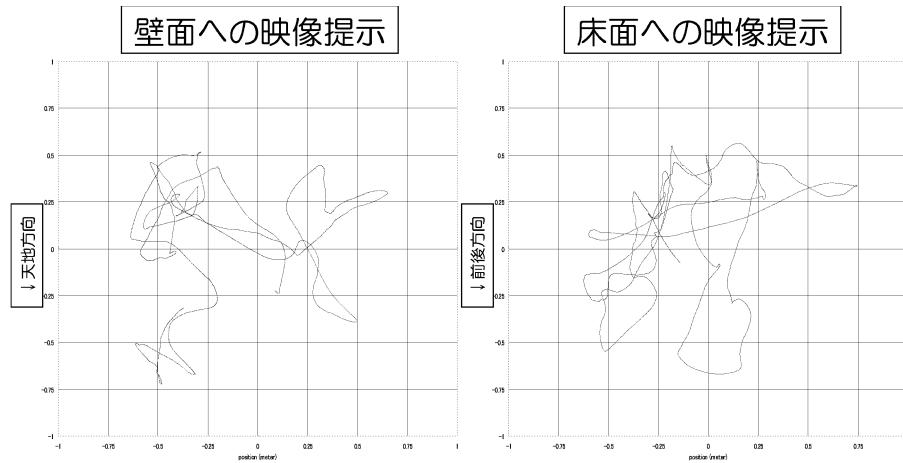


図 4.9 床面-壁面実験

イを床面と壁面に切り替えた場合の比較を示している。左右方向の軸(X)は共通であり、上下方向の軸が床面での試行の場合は奥行方向(Z)、壁面における試行の場合は、転地方向(Y)となっている。

床面による試行の方が、短い時間により広い面積を動き回っていることがわかる。この実験においても動作軌跡はタンジブルグリップの動作軌跡であり、把持している手腕しか記録されていない。記録ビデオと比較すると、床面提示においてはみられない行動として、壁面への提示の場合は、被験者が徐々にスクリーンに近づく傾向があり、時々補正される。また、描画オブジェクトの可動範囲を狭くした場合、被験者は直立不動のまま体験し、2つのモードでの軌跡の傾向の違いはほとんど確認できなかった。

# 第 5 章

## 結論

### 5.1 展示発表を通した実験より

#### 5.1.1 触覚を使うまでの考察

実際に体験展示を通して、提案システムの可能性と有効性については感触を得たが、あえて問題点を列挙するならば、様々なコンテンツに対応するための仕組みと、安全性について挙げることができる。様々なコンテンツに対応させる上で、現状使用しているモータでは幾分、力が足りないように感じた(2N程度)。壁を触ったり、物を動かしたり、というコンテンツであればそれほど問題はないが、乱暴な子供はより重いものや強い衝撃を求める傾向があった。しかしながら、モータのトルクを上げることは、同時に安全性についても危険性が生じるため、相反事項といえる。

#### 5.1.2 体験時間について

ペンギンホッケーのゲームデザインは「気の済むまで遊べるように」という設定であり、特に時間制限を設けていなかった。興味の強い体験者は3分以上、かつ数回に渡って体験していた。実験を行ったイベントの性質上、体験時間を限定せず、できるだけ多くの体験者が公平に体験できるように体験者を回転させており、残念ながら正確な値として測定できていない。体験時間やリピータ回数はコンテンツの面白さを客観的に評価可能な指標になりえるため、機会があれば重点的に測定してみたい。

### 5.1.3 より詳細な評価についての考察

タンジブル・プレイルームの提案要素おののについて、さらに深い有効性を検討することをふまえ、本報告で記したペンギンホッケーとは別に、以下のようなモードで同様の体験時間と移動軌跡を軸とした比較検討行った。

- (1) デスクトップ方式
- (2) マウス操作によるデスクトップ方式
- (3) RTS 処理速度を 2 倍に設定したデスクトップ方式
- (4) RTS 処理速度を 2 倍に設定したマルチプロジェクト方式

予備測定として、おのの体験してみところ、全く感想の違うシステムとなってしまい、主観評価においても単純に比較することが難しかった。

特に(4)において、低年齢の体験者で試したところ、通常バージョンで見られた体験者の活発な動きはほとんどなく、空振りが多く、楽しめている様子は観察できなかった。物理シミュレーション速度が倍になるということは、実世界においては同じ質量でも衝突時の衝撃は大きくなるということであり、強すぎる力覚フィードバックにより、恐怖を感じ、床面スクリーン内に踏み込んでいけないという考察ができる。

本研究にて用いた動作軌跡と体験時間による提示システムの評価は、このような場合においても、比較的理 解しやすいデータを示すことができる。今後の課題として、エンタテイメントシステム開発にとって、より意味のある反応に寄与するパラメータ抽出と、定量的な評価方法について、より客観性のある解析手法を用いて検討されるべきであると考えている。

### 5.1.4 その他のコンテンツの可能性

ペンギンホッケーはタンジブル・プレイルームの 1 コンテンツ例であり、提案システムは他のコンテンツと置換可能である。例として、砂遊びのように実際の地球上の土地形状を変化できる「地形ビジュアリゼーション」や、風や揚力を感じることのできる「気球フライトシミュレータ」、子供向けに設定された安全なボウリングゲーム、TV アニメーションの登場キャラクタのような空想上の生物を捕獲するようなゲームなどが挙げられる。

いずれの例においても、触覚や力覚、リアルタイムシミュレーションや歩行可能な大画面ディスプレイがより生かされるシチュエーションである。将来的にはタンジブル・プレイルームを床面提示型触覚エンタテイメントシステムのプラットフォームとして一般化させ、ソフトウェア開発者が、タンジブルグリップを含めたコンテンツソフトウェアを開発するのみで利用できるようになるべきであろう。



図 5.1 コンテンツ例 1: 「地形ビジュアリゼーション」

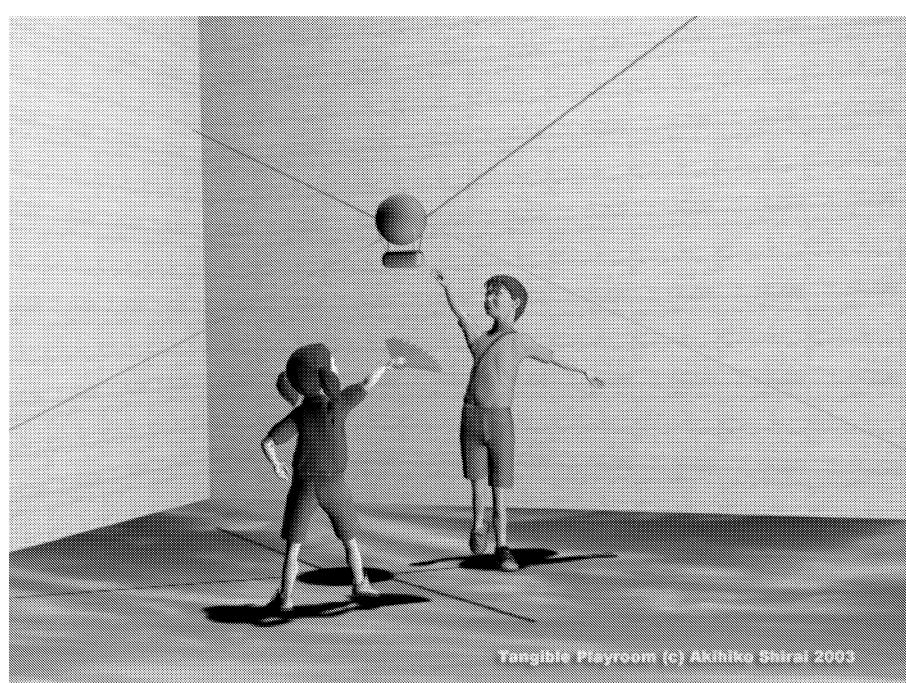


図 5.2 コンテンツ例 2 「気球フライトシミュレータ」

## 5.2 まとめ

子供向け触覚 VR エンタテイメントの基礎となるシステムとして、必要となる 3 つの要素を提案し、実現するシステムである「タンジブル・プレイルーム」を、床面への映像投影、糸張力型力覚装置 SPIDAR、リアルタイム物理シミュレータ、キャラクタアルゴリズム等を用いて実際に開発した。

またそのコンテンツ例として、特に低年齢の子供とハンディキャップを持った子供を対象にしたコンテンツ「ペンギンホッケー」を開発し、不特定多数の体験者に対し展示体験を行うことで、提案要素の受容を確認した。また体験者からアンケートを回収することにより、触覚 VR エンタテイメントに対する主観評価と、既存の TV ゲームシステムとの比較を詳細な年齢層にわたって取得し、提案システムの可能性を検討した。

コンピュータエンタテイメントが子供たちに及ぼす影響は非常に大きい。近年急速に拡大している映像やネットワークを中心としたエンタテイメントシステムから、本研究で提案するような触覚や身体を積極的に使った、新しいエンタテイメントシステムを提供していくことが出来れば幸いである。今後は、本報告の内容を基本に、触覚 VR エンタテイメントにおける有効なコンテンツデザインのための要素と評価、提案システムの安全性、実用化のための開発ソフトウェア環境について研究を進めたい。

## 5.3 関連発表

### 5.3.1 論文

#### 【学術論文】

“タンジブル・プレイルーム：「ペンギンホッケー」”，白井暁彦，長谷川晶一，小池康晴，佐藤誠，TVRSJ Vol.7 No.4, 2002.

“Penguin Hockey”: A Tangible Playroom for Children, Akihiko Shirai, Shouichi Hasegawa, Yasuharu Koike and Makoto Sato, The Journal of the Society for Art and Science, Vol. 1 No. 3 pp.117-124. 2002.

「エンタテイメントシステム」：白井暁彦，芸術科学会論文誌，第3巻，第1号，2004(採録，発行未済).

#### 【国際会議】

“Penguin Hockey”: A Tangible Playroom for Children, Akihiko Shirai, Shouichi Hasegawa, Yasuharu Koike and Makoto Sato, NICOGRAPH International, pp.149-154, May 2002.

“the Labyrinth Walker” / A New Step-in-Place Locomotion Interface for Virtual Environment With Large Display System Makoto Sato, Laroussi Bouguila, Shoichi Hasegawa, Hashimoto Naoki, Naoki Matsumoto, Atsushi Toyama, Akihiko Shirai, ACM SIGGRAPH 2002 Emerging Technologies, 2002. <http://www.siggraph.org/s2002/conference/etech/newstep.html>

Penguin Hockey: A Virtual Reality game system for children, Akihiko Shirai, Shouichi Hasegawa, Yasuharu Koike, Makoto Sato, International Workshop on Entertainment Computing (IWEC2002), May 2002.

Foot Interface: Fantastic Phantom Slipper, Akihiko Shirai, Masaru SATO, Yuichiro KUME, Machiko KUSAHARA, ACM SIGGRAPH'98 Enhanced Realities, Orlando, Florida U.S.A., 1998.

#### 【研究会等】

コンピューターゲームの興奮度定量化 (1) 主観評価を使用したゲームジャンルの分類，白井暁彦，小池康晴，佐藤誠，情報処理学会シンポジウムシリーズ (GPW2001)，Vol.2001, No.14, pp.33-40, 2002年.

タンジブル・プレイルーム，「協調と制御」コミュニケーションとインタラクション分野分科会，東京，17 Dec 2002.

ラビリンスウォーカー，高臨場感ディスプレイフォーラム，東京，14 Nov 2002.

幼児向け触覚エンタテイメントシステムの提案，白井暁彦，長谷川晶一，小池康晴，佐藤誠，日本バーチャルリアリティ学会，第7回大会論文集，2002.

コンピューターゲームの興奮度定量化 (1) 主観評価を使用したゲームジャンルの分類, 白井暁彦, 小池康晴, 佐藤誠, 情報処理学会シンポジウムシリーズ (GPW2001), Vol.2001, No.14, pp.33-40, 2002 年.

力覚ディスプレイを用いた子供向け VR ゲームコンテンツ; 「ペンギンホッケー」, 白井暁彦, 井上雅晴, 鄭承珠, 田上信一郎, 外山篤, 藤井伸旭, 平井卓哉, 松本直樹, 三浦雄文, 長谷川晶一, 佐藤誠, 日本バーチャルリアリティ学会, 第 6 回大会論文集, 2001.

### 5.3.2 展示発表

- (1) 2001 年 8 月 「福崎バーチャル子供わくわく広場」(初出, マルチプロジェクト方式, PC3 台利用)
- (2) 2001 年 9 月 「日本 VR 学会第 6 回大会」(デスクトップ方式)
- (3) 2002 年 5 月 「IWEC2002(International Workshop on Entertainment Computing)」(デスクトップ方式)
- (4) 2002 年 11 月 「東京工業大学すずかけ祭」(天井鏡方式)
- (5) 2003 年 5 月 「東京工業大学すずかけ祭」(天井鏡方式)
- (6) 2003 年 7 月 「ACM SIGGRAPH 2003 SIGKIDS (Sandiego, USA)」(モバイルフレーム方式)
- (7) 2003 年 11 月 「東京工芸大学 インタラクティ部展 2003」(モバイルフレーム方式)

### 5.3.3 受賞

- NICOGRAPH International Best Paper Award "Penguin Hockey": A Tangible Playroom for Children(2002 年 5 月)
- 芸術科学会 論文誌 論文賞 "Penguin Hockey": A Tangible Playroom for Children(2003 年 3 月)
- 日本 VR 学会 学術奨励賞「幼児向け触覚エンタテイメントシステムの提案」(2003 年 3 月)
- 芸術科学会機関誌「DiVA」(夏目書房) DiVA ギャラリー優秀賞「ラビリンスウォーカー」(2003 年 4 月)

- 芸術科学会 DiVA 展 優秀賞 「the Labyrinth Walker」(2003 年 5 月)
- 芸術科学会 DiVA 展 入選 「Dynamo: 触覚 VR 開発環境 SPRINGHEAD を用いたアートワーク習作」(2003 年 5 月)
- ACM SIGGRAPH SIGKIDS 2003 Best Multilingual and/or Omnilingual Award (2003 年 7 月)
- 日経ビジュアルサイエンスフェスタ 入選 「実時間物理シミュレータを用いた触覚 VR エンタテイメントシステム “Tangible Playroom”」(2003 年 12 月)

#### 5.3.4 一般出版物掲載

- 「ラビリンス・ウォーカー」, DiVA ギャラリー, 芸術科学会学会誌 DiVA, 4 号, 2003 年.
- 「ペンギンホッケー」, DiVA ギャラリー, 芸術科学会学会誌 DiVA, 2 号, 2001 年.
- 「超テク 日本の底力」, 日経産業新聞, 2003 年 2 月 28 日.
- 「実時間物理シミュレータを用いた触覚 VR エンタテイメントシステム “Tangible Playroom”」, 日経ビジュアルサイエンスフェスタ, 日経サイエンス 2003 年 1 月号.

## 参 考 文 献

- [1] Ministry of Culture and Communication, France, 「La grotte de Lascaux」 ,  
[http://www.culture.gouv.fr/  
culture/arcnat/lascaux/fr/](http://www.culture.gouv.fr/culture/arcnat/lascaux/fr/)
- [2] H. Valladas, et al, "Palaeolithic paintings: Evolution of prehistoric cave art", Nature, No.413, 479 (2001).
- [3] エリコニン, 天野幸子,伊集院俊隆(訳), 1989,『遊びの心理学』, 新読書社, 407pp.
- [4] 梅澤啓一,「乳幼児期における遊びの発達メカニズム」,『美作女子大学・美作女子大学短期大学部紀要』, 美作女子大学, Vol.46, pp.22-35 (2001) .
- [5] Kollarits J., "Quelques considerations sur la biologie et la psychologie du jeu", Archives de Psychologie, Geneve (1940).
- [6] Johan Huizinga, 1938, "Homo Ludens", (高橋英夫訳『ホモ・ルーデンス』中公文庫,1973).
- [7] Roger Caillois, 1958, "Les jeux et les hommes", Gallimard.
- [8] R. カイヨワ,多田道太郎,塚崎幹夫(訳), 1990,『遊びと人間』,講談社学術文庫920, 389pp.
- [9] J. ピアジエ,B. イネルデ,波多野 完治(訳), 1969,『新しい児童心理学』, 文庫クセジュ 461, 白水社, 161pp.
- [10] J. ピアジエ,E. H. エリクソン,et al, 2000,『遊びと発達の心理学 心理学選書』,黎明書房, 220pp.
- [11] Marvin Minsky, 1988, "The Society of Mind", Simon and Schuster, 336pp.
- [12] Marvin Minsky, 安西 祐一郎(訳),1990,『心の社会』,産業図書,574p.

- [13] 松田恵示, 2003,『おもちゃの遊びとリアルー「おもちゃ王国」の現象学ー』, 世界思想社, 218pp.
- [14] 森下みさ子, 1996,『おもちゃ革命 ー手遊びおもちゃから電子おもちゃへ』, 岩波書店, 182pp.
- [15] 三好春樹, 下山名月, 上野文規, 1999,『遊びリテーション学』, 雲母書房 シリーズ 生活リハビリ講座, 279pp.
- [16] 白井暁彦, 小池康晴, 佐藤 誠 : コンピューターゲームの興奮度定量化(1) 主観評価を用いたゲームジャンルの分類, 情報処理学会シンポジウムシリーズ(GPW2001), Vol.2001, No.14, pp.33-40, 2002.
- [17] 白井暁彦, 佐藤勝, 草原真知子, 久米祐一郎 : 足インターフェイスによる複合現実感アミューズメントシステム : ファンタスティックファントムスリッパ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, PP.691-698(1999).
- [18] Akihiko Shirai, Masaru Sato, Yuichiro Kume and Machiko Kusahara, "Foot Interface: Fantastic Phantom Slipper", SIGGRAPH98 - 25th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Orlando(1998).
- [19] "Penguin Hockey": A Tangible Playroom for Children, Akihiko Shirai, Shouichi Hasegawa, Yasuharu Koike and Makoto Sato, The Journal of the Society for Art and Science, Vol. 1 No. 3 pp.117-124. 2002.
- [20] 館 瞳, 1999,『ロボットから人間を読み解く』, 日本放送出版協会, NHK 人間講座, 191pp.
- [21] 館 瞳, 2002,『バーチャルリアリティ入門』, 筑摩書房, ちくま新書, 222pp.
- [22] 佐藤誠, 山崎芳男, 岩田洋夫, 館 瞳, 他共著, 1999,『バーチャルリアリティー人工現実間と人間のかかわりを考えるー』1999 第13回「大学と科学」公開シンポジウム組織委員会編, クバプロ, 179pp.
- [23] Gordon E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits", Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965.
- [24] Randima Fernando, Mark J. Kilgard, 中本 浩(訳), 2003,『The Cg Tutorial 日本語版』, ボーンデジタル, 335pp.

- [25] Yoshifumi Kitamura, Takashige Konishi, Sumihiko Yamamoto, and Fumio Kishino, "Interactive stereoscopic display for three or more users", Computer Graphics Annual Conference Series (Proc. of SIGGRAPH 2001), pp.231-239, 2001.
- [26] 北村喜文, 小西孝重, 山本澄彦, 岸野文郎: 多人数共有型立体ディスプレイ IllusionHole, 映像情報メディア学会誌, Vol. 57, No. 10, pp. 1320-1327, Oct 2003.
- [27] 橋本直己, 長谷川晶一, 佐藤誠: Hybrid型スクリーンを用いたマルチプロジェクションディスプレイ: 第18回 NICOGRAFH 論文コンテスト論文集, pp.27-30 (2002).
- [28] Naoki Hashimoto, Jaeho Ryu, Masami Yamasaki, Tsuyoshi Minakawa, Haruo Takeda, Shoichi Hasegawa, Makoto Sato, "D-vision: Immersive Multi-Projection Display with a Curved Hybrid Screen", Proceedings of VSMM2002 (the 8th International Conference on Virtual System and MultiMedia), pp.192-201 (2002).
- [29] Jaeho Ryu, Naoki Hashimoto, Shouichi Hasegawa, Makoto Sato, "Developing an Immersive Multi-Projection System with Hybrid Screen", Proceedings of ICAT2002, pp.22-29 (2002).
- [30] 二瓶健次, 1996, 『病院に動物園がやってきた! -子供と家族にやさしい医療を求めて』, ジャストシステム, 280pp.
- [31] 二瓶健次: 特集 子供とVR「医療とVR」, 日本バーチャルリアリティ学会学会誌, VOL.4, NO.2, (1999).
- [32] 二瓶健次: 特集 心理学とVR「バーチャルリアリティは子供に何ができるか—臨床面でのVR—」, 日本バーチャルリアリティ学会学会誌, VOL.8, NO.3, (2003).
- [33] 松本直樹, 長谷川晶一, 橋本直己, 小池康晴, 佐藤誠: 等身大視点と鳥瞰視点を組み合わせたインタラクティブな都市空間評価システム: 日本バーチャルリアリティ学会第7回大会論文集, pp.475-476 (2002).
- [34] 橋本直己, 松本直樹, 武山泰豊, 岩下克, 長谷川晶一, 佐藤誠, 等身大仮想環境を用いた都市環境評価のための複合インターフェース, 情報科学技術フォーラム FIT2003, (2003).
- [35] GT Force, ロジクール, Logitech and Immersion(2000).
- [36] DUALSHOCK2, ソニー・コンピュータエンタテインメント(2000).

- [37] Makoto Sato, Eguchi Yasuo, Hatano Ken and Laroussi Bouguila, “Virtual Basketball”, SIGGRAPH97 - 24th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Los Angels(1997).
- [38] しらいあきひこ, 上條慎太郎, 長谷川晶一, 佐藤誠, “Dynamo : 触覚 VR 開発環境 SPRINGHEAD を用いたアートワーク習作”, 2003 年 NICOGRAPH 春季大会論文 & アート部門コンテスト, pp.160-161, 2003.
- [39] 田上信一郎, 長谷川晶一, 橋本直己, 小池康晴, 佐藤誠, “Borland C++ Builder を用いた VR アプリケーション開発環境の構築”, 日本バーチャルリアリティ学会第 7 回論文集, pp365-368, 2002.
- [40] 岡田直樹, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠, “物理法則に基づいた力覚 VR 環境構築ソフトウェアの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会第 8 回論文集, pp465-468, 2003.
- [41] 藤井伸旭, 長谷川晶一, 橋本直己, 小池康晴, 佐藤誠, “ペナルティー法を用いた剛体運動シミュレータの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会第 7 回論文集
- [42] S. Hasegawa, N. Fujii, Y. Koike, and M. Sato, “Real-time Rigid Body Simulation Based on Volumetric Penalty Method”, Proc. of Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.326-332, 2003.
- [43] 長谷川晶一, 田崎勇一, 佐藤誠, “ハプティックインタラクションのための物理ベースモデリング”, 日本バーチャルリアリティ学会第 8 回論文集, pp469-472, 2003.
- [44] 深谷和子他, 「運動の苦手な子」, モノグラフ小学生ナウ, Vol.20, No.1, p.40, p.113, ベネッセ教育研究所(2000).
- [45] Wisneski, C., Orbanes, J. and Ishii, H., PingPongPlus, in Conference Abstracts and Applications, SIGGRAPH '98, ACM, July 1998, pp.111.
- [46] A.F. Bobick, S.S. Intille, J.W. Davis, F. Baird, L.W. Campbell, Y. Ivanov, C.S. Pinchanez, A. Schutte, and A. Wilson. The KidsRoom: A perceptually-based interactive and immersive story environment. PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments 8, 4, pp.367-391(Aug. 1999).
- [47] Bruce M. Blumberg, “Swamped! Using Plush Toys to Direct Autonomous Animated Characters”, SIGGRAPH98 - 25th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Orlando(1998).

- [48] Bill Tomlinson, Bruce M. Blumberg, "AlphaWolf", SIGGRAPH 2001 Conference Abstracts and Applications, Los Angeles(2001).
- [49] Tamio Kihara, Tohihiro Anzai, etc: Moppet, Cyberarts, PRIX ARS ELECTRONICA 97, pp.130-131, 1997.
- [50] 木原民雄, 草原真知子, 安田 浩: 場のアートとネットワークのアート, 情報処理学会論文誌, Vol.44 No.02(2003).
- [51] 木下孝司, 「遅延提示された自己映像に関する幼児の理解: 自己認知・時間的視点・『心の理論』の関連」, 発達心理学研究, 日本発達心理学会, Vol.12(2001).
- [52] 岩田洋夫, 矢野博明, 中泉文孝: HapticScreen を用いたメディアインスタレーション: ANOMALOCARIS, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol.5, No.1(2000).
- [53] Masami Yamasaki, Tsuyoshi Minakawa, Haruo Takeda, Shoichi Hasegawa, Makoto Sato, "Technology for Seamless Multi-Projection onto a Hybrid Screen Composed of Differently Shaped Surface Elements", In proceedings of Seventh Annual Immersive Projection Technology symposium, (2002).
- [54] 橋本直己, 倉橋雅也, 佐藤誠: 曲面スクリーンを用いたマルチプロジェクションディスプレイのための映像生成手法: ヒューマンインターフェース学会研究報告, Vol.5, No.3, pp.61-66 (2003).
- [55] 柳在鎬, 橋本直己, 佐藤誠: 没入型ディスプレイにおける視覚誘導自己運動の分析: ヒューマンインターフェース学会研究報告, Vol.5, No.3, pp.123-128 (2003).
- [56] Makoto Sato, Jaeho Ryu, Hidenori Maruta, Katsuhito Akahane, Masaru Iwashita, Naoki Hashimoto and Shoichi Hasegawa, "Immersive VR System "D-vision" for Universal Design" Proceedings of HCI International 2003, The 10th International Conference on Human-Computer Interaction, Vol.4, pp.1472-1476 (2003)
- [57] Akihiko Shirai, Shouichi Hasegawa, Yasuharu Koike, Makoto Sato, "Penguin Hockey: A Virtual Reality game system for children", International Workshop on Entertainment Computing (IWEC2002), May 2002.
- [58] 白井暁彦, 井上雅晴, 鄭承珠, 田上信一郎, 外山篤, 藤井伸旭, 平井卓哉, 松本直樹, 三浦雄文, 長谷川晶一, 佐藤誠, 力覚ディスプレイを用いた子供向けVRゲームコンテンツ; 「ペンギンホッケー」, 日本バーチャルリアリティ学会, 第6回大会論文集, 2001.

- [59] 白井暁彦, 小池康晴, 佐藤誠, ”コンピューターゲームの興奮度定量化 (1) 主観評価を使用したゲームジャンルの分類”, 情報処理学会シンポジウムシリーズ (GPW2001), Vol.2001, No.14, pp.33-40, 2002.
- [60] Akihiko Shirai, Shouichi Hasegawa, Yasuharu Koike and Makoto Sato, ”Penguin Hockey”:A Tangible Playroom for children, NICOGRAPH International Conference 2002.
- [61] Makoto Sato, Laroussi Bouguila, Shoichi Hasegawa, Hashimoto Naoki, Naoki Matsumoto, Atsushi Toyama, Akihiko Shirai, ”the Labyrinth Walker” / A New Step-in-Place Locomotion Interface for Virtual Environment With Large Display System, ACM SIGGRAPH 2002 Emerging Technologies, 2002.
- [62] 白井暁彦, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠, “幼児向け触覚エンタテイメントシステムの提案”, 日本バーチャルリアリティ学会, 第7回大会論文集, 2002.
- [63] 田上信一郎, 長谷川晶一, 橋本直己, 小池康晴, 佐藤誠, “Borland C++ Builder を用いた VR アプリケーション開発環境の構築”, 日本バーチャルリアリティ学会第7回論文集, pp365-368, 2002.
- [64] 岡田直樹, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠, “物理法則に基づいた力覚 VR 環境構築ソフトウェアの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会第8回論文集, pp465-468, 2003.
- [65] 藤井伸旭, 長谷川晶一, 橋本直己, 小池康晴, 佐藤誠, “ペナルティー法を用いた剛体運動シミュレータの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会第7回論文集
- [66] S. Hasegawa, N. Fujii, Y. Koike, and M. Sato, “Real-time Rigid Body Simulation Based on Volumetric Penalty Method”, Proc. of Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.326-332, 2003.
- [67] 長谷川晶一, 田崎勇一, 佐藤誠, “ハaptiックインタラクションのための物理ベースモデリング”, 日本バーチャルリアリティ学会第8回論文集, pp469-472, 2003.

## 謝 辞

本論文を執筆するにあたり、大変多くの方のご指導、ご支援を賜りました。

まず、本研究を普段より懇切丁寧にご指導くださった指導教官の佐藤誠教授には、研究に関する様々な助言をいただくと共に、本研究を行うためのすばらしい環境を与えていただき、多大な支援を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。助教授の小池康晴先生には科学技術振興事業団のプロジェクトを始め、研究生活面でも多大な支えをいただきました。

佐藤小池研究室の皆様には、輪講や各プロジェクトにおける討論だけでなく、展示発表での機材、設営、開発において多大なるご助力をいただきました。特に、初期の開発を助けていただいた、井上雅晴、鄭承珠、田上信一郎、外山篤、藤井伸旭、平井卓哉、松本直樹、三浦雄文氏ら、また SPRINGHEAD や the Labyrinth Walker の開発においては、岡田直樹、小林敏和両氏、海外における発表においては村山淳、石田善彦、岩下克、長田陽介、加藤光章氏らに厚く御礼申し上げます。また、橋本直己助手、金載休助手、長谷川晶一助手には技術面、研究の進め方など多くのご助力を頂きました。ここに感謝の意を記します。その他多くの方々にも、研究室における充実した研究生活を送る上で大変お世話になりました。

子供と VR をテーマに発表の場を提供していただいた、国立成育医療センターの二瓶健二先生、(財)イメージ情報科学研究所の滝沢由美子様、Computer Museum of America の職員の皆様、SIGGRAPH SanDiego 支部の Alan B. Scrivener 氏とご家族、青梅あけぼのキリスト教会の皆様、大久保真道先生、そして研究にご理解いただき、数多くの受賞や論文の査読、発表にお付き合いいただいた芸術科学会会長の中嶋正之先生、日本 VR 学会の原島博先生、館暲先生、岩田洋夫先生、(株)セガ武田博直氏をはじめ他の多くの方に、感謝の意を記します。執筆、進路において多大なご支援を頂きました(財)NHK エンジニアリングサービス小林希一様、研究の側面でご支援いただいた東京工芸大学の久米祐一郎先生、曾根順治先生、小川真理子先生、永江孝規先生、インタラクティ部の皆さんに感謝の意を記します。

最後に、自らの博士論文執筆の合間に中国語指導を頂いた妹の順、温かく見守ってくれた両親や親戚、生活面で多大なご理解とご支援を頂いた妻の両親、そして最後まで笑顔で支えてくれた最愛の妻 久美子と息子 成彦に深く感謝いたします。