

博士論文

インタラクティブな視触覚ディスプレイの開発と  
メディア表現の拡張のための効果の検討

平成 28 年度

人間総合科学研究科 博士後期課程芸術専攻  
串山 久美子

筑波大学

# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 メディアアートとテクノロジーの融合による表現の拡張	1
1.1.2 人間の体性感覚による表現の拡張	2
1.1.3 視覚表現を拡張する触覚作品の試み	3
1.1.4 触覚研究の先行研究	5
1.1.5 福祉としての触覚ディスプレイ	6
1.1.6 触覚のインタフェースデザイン	6
1.2 ディ스플레이の設計方針	7
1.2.1 テーブルトップ型システム	7
1.2.2 触覚体験の選定	8
1.3 研究の目的と方法	9
1.4 研究の意義	10
1.5 論文の構成	10
<b>第 2 章 温冷感覚呈示ディスプレイによる表現の拡張</b>	12
2.1 温度の体性感覚	12
2.1.1 温度感覚特性	13
2.1.2 温度感覚ディスプレイの実装上の課題	17
2.1.3 将来の展望	19
2.1.4 考察および結論	19
2.2 温冷呈示大型ディスプレイの制作	20
2.2.1 システム	20
2.2.1.1 システム構成	20
2.2.1.2 ディ스플레이表面の加工	22
2.2.1.3 制御方法	23
2.2.1.4 温度性能測定	23
2.2.2 画像生成	24
2.2.2.1 イベント部	24
2.2.2.2 画像生成部	24
2.2.3 表現	27

2.2.4	メディアセンターでの展示	28
2.2.5	体験者の観察	29
2.2.6	考察	30
2.2.7	結論	31

### 第3章 温冷感覚呈示小型ディスプレイによる表現の拡張 32

3.1	温冷呈示の定量化実験	32
3.1.1	系列カテゴリ法を用いたヒト手掌部における温度感覚特性の評価	32
3.1.1.1	被験者	32
3.1.1.2	手続き	33
3.1.1.3	系列カテゴリ法による温度感覚の尺度値導出法	34
3.1.1.4	結果と考察	36
3.1.2	ヒト手掌部における温度刺激の間隔と温度の識別特性の関係の評価	36
3.1.2.1	被験者	37
3.1.2.2	呈示刺激	37
3.1.2.3	手続き	38
3.1.2.4	結果	39
3.1.3	考察	40
3.1.4	結論	41
3.2	温冷呈示による小型視触覚ディスプレイの制作	42
3.2.1	システム構成	42
3.2.2	画像コンテンツ	44
3.2.2.1	サーマルグリルイリュージョンの表示コンテンツ	44
3.2.2.2	温冷呈示ができるお絵描きシステム	45
3.2.3	考察	48
3.2.4	結論	50

### 第4章 温冷感覚呈示ディスプレイの応用と考察 51

4.1	視覚障がい関係者による温冷呈示ディスプレイヒアリング調査	51
4.1.1	視覚障がい者へのヒアリング調査	51
4.1.2	障がい児教育に関わる教員へのヒアリング調査	53
4.1.2.1	緒言	53
4.1.2.2	共用化に関するモニター調査	53
4.1.3	考察	54
4.1.4	まとめ	54
4.1.5	結論	54

4.2	温冷感覚呈示ディスプレイの応用	55
4.2.1	ビデオゲームインタラクションの試作	55
4.2.1.1	はじめに	55
4.2.1.2	実装	56
4.2.1.2.1	温冷感呈示位置	56
4.2.1.2.2	ハードウェア	56
4.2.1.2.3	ソフトウェア	57
4.2.1.3	ユーザ観察	57
4.2.1.4	考察	57
4.2.2	サーモチェア	58
4.2.2.1	システム概要	58
4.2.2.2	ユーザ観察	59
4.2.2.3	考察	60
4.3	温冷呈示ディスプレイのメディア表現を拡張する効果の考察	62
4.3.1	温度呈示と視覚・聴覚感覚の連動のよる技術の拡張について	62
4.3.2	人間の体性感覚に即した表現の拡張について	62
4.3.3	温度呈示と視覚・聴覚感覚の連動のよる表現の拡張について	62
4.3.4	持続可能な体験手法について	64
4.4	結論	65

<b>第5章</b>	<b>砂状硬軟感覚呈示ディスプレイによる表現の拡張</b>	<b>66</b>
5.1	砂状硬軟感覚呈示ディスプレイの検討	66
5.2	システム構成	68
5.2.1	技術選定理由	69
5.2.2	ディスプレイサイズ	69
5.2.3	タッチパネル	69
5.2.4	スチールボール	69
5.2.5	制御方法	70
5.2.6	画像生成	72
5.3	表現	73
5.4	観察とヒアリング	74
5.5	応用ワークショップによる遊びの誘発	75
5.6	電磁石を使用した砂状硬軟感覚呈示ディスプレイの考察	80
5.6.1	硬軟感覚呈示体験と視覚・聴覚感覚の連動のよる表現の拡張	80
5.6.2	持続可能な体験手法について	80
5.7	結論	82



<b>第6章 毛状生物感覚呈示ディスプレイによる表現の拡張</b>	84
6.1 毛状生物感覚呈示ディスプレイの制作	84
6.1.1 50インチ毛状生物呈示ディスプレイのシステム構成	85
6.1.1.1 構造	85
6.1.1.2 ユニット	87
6.1.2 画像生成	88
6.1.3 表現	88
6.1.4 毛状生物感覚呈示ディスプレイの考察	90
6.2 生物感覚呈示の定量化実験	92
6.2.1 定量化実験の概要	92
6.2.2 デジタルサイネージとして有効であるかどうかのデータ収集	92
6.2.2.1 実験目的	92
6.2.2.2 実験方法	92
6.2.2.3 実験使用対象	92
6.2.2.4 実験条件	93
6.2.2.5 実験参加者	93
6.2.2.6 測定指標	93
6.2.2.7 測定機器	93
6.2.3 感性評価アンケートおよびインタビュー	93
6.2.3.1 実験手順	94
6.2.4 実験結果	94
6.2.4.1 視線軌跡	95
6.2.4.2 心拍数	95
6.2.4.3 唾液アミラーゼ活性	96
6.2.4.4 感性評価	97
6.2.4.5 インタビュー	99
6.2.5 生物感覚呈示ディスプレイ定量化実験の考察	99
6.3 結論	100
 <b>第7章 考察</b>	 101
7.1 人間の体性感覚に即した表現	101
7.2 工学システムを使用した表現	102
7.3 メディア体験の拡張	104
7.4 持続可能な体験表現手法	107
7.5 まとめ	110

<b>第 8 章 結論</b>	112
8.1 人間の体性感覚に即した表現	112
8.2 工学システムを使用した表現	112
8.3 新しいメディア体験による表現の拡張	113
8.4 まとめ	114
8.5 今後の課題	114

謝辞	116
参考文献	117

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究の背景

インターネットでのコミュニケーションが普及する傍ら，人と人との直接的なコミュニケーションのあり方も再認識されるようになってきた．視覚，聴覚，触覚，臭覚，味覚の五感のうちでも触覚を使用したスキンシップは人の原始的なコミュニケーション手段であり，近年では医学的な効果も解明されつつある．人はものを触ったり，撫でたり，掴んだりすることの延長として手で道具をつくり，道具をにぎり，道具を使う行為があり，その道具の延長として機械をつくり，その技術を使用して表現活動を行ってきた．

また，国籍の違いや障がい者と健常者など多様性のある人々にも同じ場で楽しみを共有できる場やコミュニケーションを促進するような触覚に重点をおいたアクセシブルなインタフェースは少ない．多様性のある人々に対し，アクセシブルな触覚インタフェース技術の開発やその技術を利用したアートやデザイン表現は社会的に重要な課題であると考ええる．

本研究では，視覚と触覚をインタラクティブに呈示する技術と表現に注目し，インタラクティブな視触覚呈示ディスプレイの開発しそれを利用したメディア表現の拡張のための効果について検討をする．

#### 1.1.1 アートとテクノロジーの融合による表現の拡張

本研究で使用する「メディア表現」とは，メディア（媒体）を使用したアートやデザインなどのクリエイティブな表現を示す．語源由来辞典によるとアートの語源は，ラテン語の「アルス(ars)」アルスには，「自然の配置」「技術」「資格」「才能」などの意味がある．「アルス」の語源は，テクニクの語源となっているギリシャ語の「テクネ (techne)」の訳語である．語源をたどれば，「アート」と「技術」は同じ語源を持つ．テクノロジー(technology)は，広辞苑によると，「1.物事を巧みに行うわざ．技巧．技芸．2.科学を実地に応用して自然の事物を改変・加工し，人間生活に利用するわざ．」とある．

デジタル技術を用いて制作されたインタラクティブ性の特性をもつメディアアート作品とインタフェースやバーチャルリアリティなどの工学系の研究に多くの共通点が見られるようになってきた．近年のメディアアートの状況として，ACM.SIGGRAPH やインタラクションなどバーチャルリアリティや情報処理などの工学分野からアートやデザイン分野にアプローチする動きがある．メディアアートの国際的な祭典 Ars Electronica のようなアート系の展覧会にも多くの工学研究者が参加し，もはやどこまでが工学分野でどこからがアートか，デザインかという線引きも意味をなさなくなっている．

今日のような線引きのない状況は，20 世紀初頭の工学とアートやデザインが一体となり総合的な

創造を志向する活動期と類似した点が多い。アート表現や工学インターネット越しの会話の発達した現代において、触覚と視覚をインタラクティブに連動できる実物体のディスプレイを使用した表現がどのような体験を生み出すのか、そこでしか経験できない触体験がそのような効果をもたらすのかを明らかにしたい。これが本研究の動機となった。

情報通信コミュニケーション技術やロボット制御などの工学技術とアートやデザインの表現領域の融合であるメディアアートの文脈を、本研究では 20 世紀以前の動画を得るための装置から 20 世紀初頭の未来派やダダ、バウハウス、グループゼロや視覚探求グループなどのキネティックアートや E.A.T, フルクサスや実験工房などのアートとテクノロジーに融合したものから生まれた活動や作品をメディアアートの流れとしている。

拡張とは広辞苑によると、「範囲や規模を広げるて大きくすること」とある。工学の発明によって表現の範囲や規模を広げ拡張する試みがある。1964 年マーシャル・マクルーハン (Herbert Marshall McLuhan, 1911 年-1980 年) は『人間拡張の原理』[1]で、テクノロジーやメディアは人間の身体の「拡張」であると主張した。自動車や自転車は足の拡張、ラジオは耳の拡張であるというように、テクノロジーやメディア (媒体) は身体の特定の部分を「拡張」する。しかし、単純に拡張だけが行われるのではなく、「拡張」された必然的帰結として衰退し「断絶」を伴う。まさにグローバルヴィレッジとなった今日のインターネット社会は新たな「断絶」や「格差」を生んだかもしれない。その「断絶」を補うものにキーワードとして人の知覚や身体に関わりが深い「触覚」がないだろうか。というのが筆者の出発点の 1 つである。また、彼は『メディア論』[2]のなかで、“メディアはメッセージである”という。“われわれ自身の個々の拡張 (つまり新しい技術のこと) によってわれわれの世界に導入される新しい尺度に起因する。”(p.7)と述べている。

雑誌「WIRED」の編集長のケヴィン・ケリー (Kevin Kelly, 1952 年-) は 2014 年「テクニウム・テクノロジーはどこへ向かうのか？」[3]の中で“テクノロジー同士がネットワークされ、お互いに結びつき合って一つのシステムとしてサポートし合う体系をテクニウムと定義“し、マーシャル・マクルーハンの人間拡張の原理を引き合いに出しながら“もしテクノロジーが人間の拡張であるならば、それは遺伝子ではなく知性の拡張なのだ。つまりテクノロジーはわれわれのアイデアが拡張した身体だ。”(p.53) という。

本論文では、メディア表現が単なるコンピュータを使用したデジタル表現にとどまらず、バーチャルリアリティやインタラクティブな触覚呈示の工学技術とアートやデザインなどの表現に人間の感性を科学する感性科学を融合することによってメディア表現を拡張したことを意義とする。本研究のメディア表現を拡張するためのインタラクティブな視触覚ディスプレイを開発や、それを使用したアートやデザイン表現が、創作の表現域を広げるばかりでなく、工学システムや人間の感性を刺激し表現への拡張を促すと考える。

### 1.1.2 人間の体性感覚による表現の拡張

人間の視覚の体性感覚と工学の融合によって動画表現の拡張をおこなった。光の点滅を高速で移動させると線に見える。目の生理的な残像効果を利用し動く映像を取得する。1832 年ベルギーの数学者ジョセフ・プラトー (Joseph Antoine Ferdinand Plateau, 1801 年-1883 年)「フィナキススコープ (驚き板)」と画家 J.B. Madou による作品 [4], 1876 年フランスの E.レイノー

(Emile Reynaut, 1844 年-1918 年)がゾートロープに鏡をつけ、動画像を得る回転活動機「ブラクシノスコープ」はアニメーション作品へと続いている[5], 1882 年エティエンヌ＝ジュール・マレー (Etienne-Jules Marey, 1830 年-1904 年) は、ライフル銃の形をした連続写真撮影機を発明し、鳥の飛翔や人物の動きの連続写真を撮影し[6], 自らの研究に生かした。その技術に対し、マルセル・デュシャン『階段を降りる裸体』(1912 年)の絵画について、映画やマレーの高速写真の影響があるとデュシャン本人が述べている。[7]

20 世紀以前の実物体を伴ったアナログ技術は現代のメディアアーティスト達のアイディアを刺激する。岩井と NHK 放送技術研究所が共同で開発した「モルフォビジョン」(2005 年) [8]は、高速回転する物体に特殊な光を照射することで、視覚的イリュージョンを作り出すシステムを制作する。アーティストのジュリアン・メール(julien maire)の「Demi Pas」(2008 年) [9]は、投影機に自ら作成したミニチュアの実物体特製のスライドをとコンピュータ制御によってスライドの仕掛けを精巧に動かす現代のファンタスマゴリアのような不思議な映像を表現している。落合はアナログな時計とレンズを使用しピンホールのような映像をデジタルと融合させ幻想的な空間円形に配置し天井でアニメーションするシステムを開発しインスタレーション作品「Looking glass time」(2014 年)[10]を発表している。このように、人間の視覚の特性を利用した工学の発明によって新しい体験を伴う表現を生み出している。

19 世紀から現代にいたるまでの芸術と科学技術の歴史をみると芸術と科学技術は常にその時代の社会と関係しながらその時代の新しい表現を生み出してきた。アートとテクノロジーの融合である仕掛けや人間の知覚の特徴を利用した 20 世紀以前の視覚装置は、科学者や画家、医師、発明家達の新しいものを希求する好奇心や新しい発明によって、これまでになかった動く映像や視覚表現を得、観客に驚きや楽しさを与えることが確認できる。[11,12,13,14,15] エレキ・フータムの『メディア考古学—過去・現在・未来のために』[16]でも言うように現代のアーティストの創作活動のヒントになるものも少なくない。バーバラ・M・スタフォード (Barbara Maria Stafford) は、『アートフル・サイエンス』[17]のなかで、「アートフル・サイエンスの曖昧な領域—それは娯楽と情報、快楽と学習の間のどこかに位置を占めている—を発掘しながら、—中略—視覚的教育はアートとテクノロジー、ゲームと実験、図と語の境界線上で発達してきたという点が重要である。」と述べている。ここでも知と楽しみ、そしてサイエンスとエンタテインメントとアートのコミュニケーションの力を一体化する新しい方途をさぐろうとしていることがわかる。本研究は、表現の拡張に人間の触覚知覚を取り入れた点にユニークさがある。

### 1.1.3 視覚表現を拡張する触覚作品の試み

視覚表現を拡張する触覚的作品から触ることの意味を作品から見る。マックス・エルンスト (Max Ernst, 1891 年—1976 年) の作品に「最初の明晰な言葉のために」1923 年という作品がある。人差し指と中指を交差させ、赤い玉をつまんでいる。これはアリストテレスの錯覚という接触部位の誤認の実験に影響を受けていると言われている。アリストテレスの錯覚は、接触する人差し指と中指の間を棒の先で触ると一つのもので触られたという感覚が起こるが、その 2 本の指を交差させ同様に指の先端の間に棒で触った時には、二つのものによって触られたと感じられるという錯触の実験である。港千尋は『考える皮膚—触覚文化論』[18]のなかでエルンストの作

品は物理学者、哲学者であるエルンスト・マッハ（Ernst Waldfried Josef Wenzel Mach, 1838 年—1916 年）の 1885 年に発表された『感覚の分析』[19]に影響を受けているのではないかという指摘をしている。空間把握においては、視覚や触覚などの複合感覚が連合した科学理論を意識した作品といえよう。

触覚的視覚表現であるフロッタージュ手法を生み出したマックス・エルンストは哲学科に入学し、哲学や心理学、美術史を学び、1919 年ケルン・ダダを創設し、紙を木目上に置いて鉛筆で擦るフロッタージュ手法を開発し、1926 年、フロッタージュの作品「博物誌」を発表する。1930 年、2 作目のコラージュ小説「カルメル修道会に入ろうとしたある少女の夢」を出版した。ゾートロープに立体的なカモメが配置され、1988 年に岩井が作成した立体ゾートロープのような仕組みが描かれている。

20 世紀初頭のダダイストであるマルセル・デュシャン（Marcel Duchamp, 1887 年—1968 年）は、ガラスに描かれた造形絵画「彼女の独身者たちのよって裸にされた花嫁、さえも」（1912 年、通称：大ガラス）や回転板を使用した動く絵画ロトレリーフ（1935 年）などこれまでの美術の枠を解放する芸術家である。彼の作品のなかで、「どうぞ触ってください」（1947 年）[20]というタイトルの、乳房を模ったレリーフ状の触れる作品がある。美術作品に触る発想のなかった当時としては、時代を批評した挑戦的な作品ではなかろうか。ガラス素材のヒビの入る特性を取り込んだ素材の挑戦から、ロトレリーフの動く作品、観客の参加を促そうとする作品へと続く。作品や行動を通じて社会や人を巻き込んでいく美術家としての行為も「みるものが芸術をつくる」という彼のことばからも理解できる。触ることを美術作品という形で美術の場に積極的に仕掛け社会を巻き込んだ先駆的な作品であると考ええる。

1909 年、イタリア未来派は、イタリアの詩人 F.T.・マリネッティがフランスの日刊紙『フィガロ』に発表した「未来派宣言」をその発端とする。伝統的な芸術と社会を否定し、新しい時代にふさわしい機械美やスピード感、ダイナミズム、女性蔑視や戦争賛美を特徴とした。その背景には産業革命以降顕著になった、工業機械文明と急速な都市化がある。その F.T.マリネッティが、1921 年「触覚造形主義（タクティリズム）」を宣言している。i laboratoli tattili「タクティリズム宣言」ミラノ書房によると[21] オブジェを触りながら「作品を読む」順序を定めた最初の「触覚のタブロー（tavola tattile）」を作り、いくつかの触感的違いを分類している。紙ヤスリやホイルのような素材から得られる、確かな触感、冷たい触感のグループ、なめらかな絹やクレープ（ちぢみ）のような、温度を感じない、理性的で説得力を感じさせる触感のグループ刺激的でなま暖かく、ノスタルジーを呼び起こす、ビロードやウール、綿と絹を混ぜたクレープのような触感など 6 つのグループとその他鳥の毛（羽）、肉や魚のうぶ毛（鱗）を分類しこれらの素材によって「触覚のタブロー」を構成し、「触覚の芸術」という講演会で発表をしている。

バウハウス（Bauhaus）の教員であったハンガリー出身のモホリ・ナギ（Moholy-Nagy László , 1895 年-1946 年）は、光の造形物によって空間を変化される作品「ライト・スペース・モデュレータ」（1922 年）の設計を始める。光と運動による造形という創作理念を確立し造形理論と造形教育理論を確立し、その後シカゴをはじめ全世界の芸術・科学・技術の要素を統合しようとする教育に生かされ貢献する。そこでは、バウハウスの学生のための触覚訓練の教育のために実験用の触覚装置を作成している。圧迫感覚、刺感覚、温度感覚、振動感覚などの触覚を刺激するさま

さまざまな材料を集め、それらを、似た感覚のもの、対照的な感覚のものを含めて触覚版の上に集め、学生は長細い触覚板や回転する円筒形の触覚筒や触り心地の触覚グラフを制作している。技術や芸術の領域における素材にかかわる多方面からの理論的発想と触覚感覚を訓練する方法を取り入れた基礎教育を確立した。[22] 触感を指数によって標準化させようとする試みは興味深く、1980 年の川端の風合い評価の解析と標準化の研究[23]や 2007 年の白土らの人肌見本帳の研究[24]に通じる。また、ざらざら、つるつるなどのオノマトペによる触感の因子分析のような感性評価研究[25]にも繋がる。

ブルーノ・ムナリは（Bruno Munari, 1907 年-1998 年）は、イタリアの美術家である。彼は未来派の前衛美術家、グラフィックデザイナー、絵本作家、プロダクトデザイナー、教育者、研究家、など多くの顔を持つ。「役に立たない機械」触覚絵本をつくった。触覚に対して強い関心のあったムナリは、“さわることの意味”について大人は「触わって感じる力」を失ってしまっているか、あるいは極めてわずかしかな触覚を用いていないと語っている。[26]

このように、その時代の複合感覚が連合した科学理論を取り入れた表現や触覚、フロッタージュ手法、触ることを美術作品という形で美術の場に積極的に取り入れようとする触覚手法や宣言のような形で社会を巻き込んだ表現、触覚の感覚力を鍛える訓練や教育などの試みがこれまでの表現にみられた。本研究はアートが人間の感覚やテクノロジーと融合しながら新しい表現を拡張してきた文脈の延長として位置づけ、現代における触るものの意義や触覚による表現の拡張について取り上げる。

#### 1.1.4 触覚の先行研究

バーチャルリアリティなどの工学の分野では、日本語で「触覚」といった場合、主に二つの感覚について言及している。一つは、対象の全体的な形状や質量などを、各指の関節角度の変化や関節にかかる力として知覚、触覚・力覚情報の提示を「力覚(Haptic)」と呼び、対象のザラザラ、スベスベといった、人間の表面感覚（皮膚感覚）に情報を提示する指先の皮膚変形によって感じられる感覚皮膚感覚提示を「触覚(Tactile)」と呼ぶ。この触力覚情報の取得・提示を行うデバイスは総称して、「ハプティックインタフェース」と呼ばれる。工学分野では、近年、医療・福祉・ロボティクス、バーチャルリアリティなどの分野で触覚の重要度が増大している。触覚研究として、岩田らや梶本ら、田所、昆陽ら、吉田らや触圧覚ディスプレイでは舘ら、藤田らのインターネットでの手触りや柔らかさの伝送実験などさまざまな触覚研究がある。インタフェースやバーチャルリアリティなどの工学分野において、触感覚を呈示する研究は、遠隔操作、ロボット、手術シミュレーション、ゲームなどのエンターテインメントなどへの応用を目的としてこれまで多くの研究がある[27,28]。その主なデバイスの使用法は、皮膚表面の物理的な振幅や振動周波数に対しピンアレイを使用した呈示[29]や超音波[30]や吸引圧[31]、空気圧[32]、電気刺激[33]などを用いた装置が提案されている。その触覚呈示装置の設計をするための人間の触知覚特性として、これまでに、機械受容器の分布密度や共振周波数[34]、触覚における運動残効現象[35]などについて研究が進んでいる。皮膚感覚を活用したバーチャルリアリティ技術の確立も盛んに行われてきているが、力触覚に着目し、リアルな触覚フィードバックの実現を志向した研究が主流となっている。

触覚の再生や、すでにある触覚を拡張させるような技術や、心的イメージをともなった触感の解明やこれまでにない触感を創造する試みがされている。触覚は、あらゆるヒューマンマシンインタフェースにも関係することから、今後、工学的にも重要度がさらに高まると考えられる。

#### 1.1.5 福祉としての触覚ディスプレイ

福祉分野は、視覚や聴覚の感覚代行を目的とした障がい者支援のための触覚インタフェースの開発が最も早くから進んでいた分野である。ピン配列を圧電素子で上下させて点字や文字のパターンを提示する Linvill と Bliss らによって研究開発し、米国 TSI 社によって販売された Optacon (OPTical to TActile CONverter) はその代表的なデバイスである。福祉工学においては伊福部、井野らのピン配列の振動分布の運動パターンによって文字形状の提示とは異なる形態で情報を伝達する試み[36]もある。振動子のアレイを装着することで、障がい者に方角を伝達する研究も古くから行なわれている[37]。小林らの視聴覚障がい者用触覚ディスプレイ研究や藤本と土井らの晴眼者・視覚障がい者共用を実現する触知案内図の実用化研究がある。障がい者や高齢者のための環境設定法である「スヌーズレン」や感覚美術館など、共有の触覚空間へと社会の必要性も高い。

#### 1.1.6 触覚のインタフェースデザイン

デザインやアート表現分野においても、触覚をデザインする試みとして1990年から石井らのタンジブルビット、2004年「触覚コンタクトレンズ」や触覚サインの標準化へむけた企業のCRXプロジェクト、2004年デザイナー原らの「HAPTIC」展覧会がある。2009年JST-CREST「さわれる情報環境」(研究代表者：舘暲)による実空間コミュニケーション、ヒューマンインタフェース、メディア処理が融合した知的な触情報空間の構築を目指した研究プロジェクトが始まり、2011年仲谷、笥、白土は工学領域とデザイン領域をつないだ触感をつくる試みとして「テクタイル」を提案している[38]。これらの知見の共有として仲谷らのテクタイルの書籍「触楽入門」(2016)や渡邊の書籍「情報を生み出す触覚の知性」(2015)やHPでの「触感コンテンツ100選」(2015)、触文化のさらなる認知拡大・普及促進を目的としたハッカソン「ショッカソン(Shock-a-thon)」(2014)など触覚に関する研究が一般にも公開され、研究の重要性が注目されている。また、視触覚インタフェースが触ることで繋がる新しいコミュニケーションの手段として、触覚のブランディングデザインや体験をデザインすることについてデザインの質を向上する意味で今後の課題があると考えられる。

本研究では、視覚と触覚をインタラクティブに呈示する技術と表現に注目し、インタラクティブな視触覚呈示ディスプレイを開発しそれを利用したメディア表現の拡張のための効果の検討を行った。



## 1.2 ディスプレイの設計方針

### 1.2.1 テーブルトップ型システム

インタラクティブな視触覚ディスプレイを設計するにあたり、本研究ではテーブル型のシステムとした。テーブル型システムは、上部から覗き込むことのできる視覚的な効果や物理的に大表面を持つこと、物が置けるテーブルトップの水平配向性などの物理的形狀の特徴を持つ[39]。このような視覚的な効果や物理的な特徴により、テーブルを囲んで同じ画面を見ながら複数で共同作業ができるといった視覚に注目した作業環境や、テーブルを直接手や物で触れることができる触覚の作業環境などを多く提供できる。また、機器類をテーブル下部に収納できるため、システムの一体感を得ることができる。以上のような特徴を持つテーブル形の作品は、日常の環境の中で身近で自然な対話を可能にし、人間とコンピュータの新しい表現の相互作用に挑戦できるという点が、本研究の目的にも合致しこれを採用した。

インタラクティブなメディアアートの多くの作品は、直接触れて体験することができ、そこには作品と観客との対話が生じる。バーチャルリアリティの概念を具現化した Myron W. Krueger の「VIDEODESK Teletutoring」(1981) [40]は、1970 年に試作したコンピュータを使用したインタラクティブアート作品「VIDEOPLACE」のテーブル版で、テーブル上の手の動きをビデオでキャプチャし別の場所とのコラボレーションを図る作品である。Krueger のインタラクティブな作品が研究者を刺激し、工学を中心としたバーチャルリアリティ研究の黎明期を生んだ。以降インタラクティブ作品の出現によって、閉鎖していた現代美術作品の発表形態を観客に開放し表現体験を拡張した意味は大きい。岩井の「Composition on the Table」(1999) [41]は、人が集まる場としてのテーブルをメタファに、複数の人が映像と音が同時に創造できる空間を提案する。テーブル上にボタンやスライド盤を触り直感的に理解できるようなインタフェースを使用し、表面に投影された映像と音を気持ちよくダイレクトにコントロールする工夫がされている。体験者が参加可能な作品の出現によって作家は、作品のシステムを提案し、観客にどのような参加をさせるか参加のデザインをすることが求められるようになってきた。

実物体とコンピュータの融合した作品映像が投影されるテーブルには、人を取り巻く日常の象徴としてテーブルを素材にした作品がある。藤幡の「Beyond Pages」(1995) [42]は、白いテーブルの上に置かれた絵本の画像をペンでめくるとにページに描かれたりんごや石がインタラクティブに動く。本の可能性を示唆するだけでなく、知識や想像の世界に遊ぶための道具である本や机の本来もつ意味と機能を喚起する。串山らの「Hide-and-Seek」(1999) [43]は、現実と VR を複合させた未来の食卓を作る複合現実感(Mixed Reality)の作品である。利用者は手に磁気センサー付きの小型モニタを持ち、卓上の隠れた情報を探す。これは携帯端末を使用した情報提示できる未来の家具を提案している。

上部から覗き込む視覚的な効果や立体物、物が置けるテーブルの特徴を生かした作品を紹介する。影と物体の作品である、Minim++ 近森+久納の「KAGE」(1997-8) [44]には、円錐のオブジェから様々な影が投影されるテーブルバージョンがある。センサーでもあるオブジェに触れたときに反応する影の意外性が面白い。円錐のオブジェからその影を分離し、影をコンピュータで制御された CG 映像とすることで、物理的現象とバーチャルな現象を混在させた。石井は、「タ

ンジブル・ビット」のコンセプトのもとに「透明なインタフェース」をめざしたテクノロジーとアートの統合を試みている[45]. 「music bottles」(1999)は、ガラス瓶のふたを開けると、音楽が聴こえてくるデジタル世界とのインタフェースに変える作品で情緒的価値の創造を試みている. 寛らの「Tablescap Plus」(2006)[46]は、方向依存性スクリーンをテーブル面に利用したインタラクティブな卓上映像シアター作品である. これは、手で動かすことのできる新たな立体的な映像シアターを提案する.

河口の「Gemotion: 凹凸 Life Skin」(2000)[47]は、テーブル上に置かれた凹凸スクリーンに触ると、スクリーンそのものが生き物のように動く触覚に注目したテーブル作品である. 岩田の触覚研究「FELEX」(2001)[48]の技術協力による. ディブ・ブースロイドは、『触覚, 時間, 技術』[49]の中で、「河口の『Gemotion』は、インタラクティブな触覚的メディア (haptic media) のありうる未来的発展を、ある抽象的な形式で先取りしたものとしてみなすことができる.」とし、「コミュニケーションとしての触覚=触れることの問題系」を考えさせてくれる作品として冒頭に取り上げている.

このように 80 年代以降コンピュータ技術を使用したインタラクティブなアート作品の出現によって、テーブルそのものに視覚や聴覚を取り入れたものから、視覚と実物体、視覚と触覚など、より複合的に五感を取り入れる作品の傾向がある. さらに、表現としてテーブルの持つ文化的背景、物語性、自然回帰、シンプルに素材そのものの面白さを見せることで、より現代社会の問題を深く際立たせようとする傾向もある. それは、これからの情報社会の延長上にある問題、すなわち自然環境やヒューマンな日常感覚や身体感覚と情報社会の共存の方法を示唆している.

本研究で試みるインタラクティブな視覚と連動した温冷や砂状、毛状の触覚を持ち合わせたディスプレイを開発し、それをアートとして表現した例はメディアアートの中ではなく、新しいアート表現としてこれまでの表現を拡張することを期待した. また、メディア表現と工学技術の融合によるインタフェースや触覚ディスプレイの研究について、人間の感じ方を繊細にコントロールするための温冷や砂状、毛状の触覚呈示技術や素材の選定とそれにあった表現が重要であることを確認することができた. そのための人間の感覚の特性を知り、それにあった技術開発や表現をおこなうことが必要であると考え.

### 1.2.2 触覚体験の選定

本論文が対象とする人間の触覚に関する用語を定義する. バーチャルリアリティなどの工学の分野では、日本語で「触覚」といった場合、主に二つの感覚について言われる. 一つは、対象の全体的な形状や質量などを、各指の関節角度の変化や関節にかかる力として触覚・力覚情報の提示を「力覚(Haptic)」と呼び、人間の表面感覚（皮膚感覚）に情報を提示するザラザラなど指先の皮膚変形によって感じられる皮膚感覚提示を「触覚(Tactile)」と呼ぶ. 本論では、力覚や痛みなどの感覚まで合わせた手の動きと皮膚の接触によって得られる感覚一般を「触覚」とする.

触知状態の分類として、Gibson[50]は、パターン認知のために対象に触る過程を、能動的触知と受動的触知に分類している. 受動的触知 (passive touch) とは触覚を生起する手指の皮膚を物体に固定して、それが何であるかを認識する. このような様態は、主として触受容器の動作によって情報を得る. 一方、能動的触知 (active touch) とは手指を対象に触れるという以外に、

その特徴を把握するために手指を随意的に動かすという触運動が伴う様態である。したがって、この場合には触受容器の活動の他に手指の関節覚などの情報も認知特性に関与する。一般には、触覚によって対象を認識する場合、両者の過程は一緒になされる。まず、大まかに手指を動かして全体情報を把握し、さらに、注目する部分に触れて、そこから詳細情報を得るという過程が繰り返される。このような触認識の様態はハプティック知覚 (haptic perception) と呼ばれる。

ハプティック知覚はさらにいくつかの動作に分類でき、Lederman ら[51]はこのような動作をあ 12 に分類している。Lateral Motion(並進運動)質感, Pressure(押し込み動作) 硬さ, Static Constant(接した状態で静止) 温度, Unsupported Holding(掴み動作) 重さ, Enclosure(握り動作) 外形と大きさ, Contour Following(なぞり動作)外形と正確な形などに分類される。

本研究では、触る動作と素材に着目し、接した状態で静止し触る温冷呈示、表面を撫でたり握ったりアクティブに形状を触る砂状の硬軟呈示、形状そのものがアクティブ動きに注目した毛状の触覚呈示技術や素材を選定した。

本研究では、視覚と触覚をインタラクティブに呈示する技術と表現に注目し、インタラクティブな視触覚呈示ディスプレイを開発しそれを利用したメディア表現を拡張するための効果の検討を行った。

### 1.3 研究の目的と方法

本研究は、メディア芸術表現を創出するために、触覚の感覚の一部と視覚を連動して呈示できるインタラクティブ視触覚呈示ディスプレイを開発し、それを使用したメディア表現がどのような新しい体験や効果をもたらすかについて考察したものである。3種類の異なった感覚の視触覚呈示し、それを使用したメディア表現作品を制作し、展示等における作品体験者の、体験中の特徴的な行動や発言、体験後の感想、観察をもとに作品体験の与えた影響・効果を定性的に考察した。

まずインタラクティブな視触覚ディスプレイの表現に至った研究や先行作品を述べる。具体的には、表現の拡張について人間の知覚に注目したアートとテクノロジーの融合した実物体志向の表現や技術を取りあげた。次に人間の体性感覚に注目し、触覚呈示ディスプレイを開発するために人間の体性感覚と触覚呈示技術について調査した。それを参考に、従来技術である視覚のディスプレイに対し、これまで表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した温・冷や硬軟触、毛状生物感覚の呈示を視覚と同一箇所に表現を感受することができるディスプレイ装置を開発し、それを使用した表現を制作し多くの発表をした。展示等における作品体験者の、体験中の特徴的な行動や発言、体験後の感想、観察をもとに作品体験の与えた影響・効果を考察した。また、温度感覚や毛状の生物感覚に対する定量化実験を行いそこから得たデータをもとに考察した。

以上の定性的、定量的なデータにより、デジタルメディア作品の制作を支援する触覚呈示技術の開発によって、触覚を伴ったインタラクティブなメディア表現が観客にどのようなことをもたらすのか、人間の知覚の特性を考慮した設計によって新しいメディア表現体験を生むものであるか。芸術と工学と人間の知覚特性や感性評価などの感性科学の融合によるひとつの表現創出のた

めの拡張の効果について総合的に考察した。

## 1.4 本研究の意義

本論文には、下記の意義があると考える。

### 1) メディアアートやデザインなどの表現の拡張方法の創出

・工学とアートやデザインと感性科学の融合領域から新しい表現を生み出すための表現の拡張方法の創出することが期待できる。

### 2) 人間の感性と工学と表現の融合による触覚研究の活性化

・工学とアートやデザインと感性の融合領域を活性化し、そこから新しい技術や研究を創出することが期待できる。

### 3) アクセシブル社会への触覚情報デザイン波及効果

・障がい者と健常者が同じ場で情報を共有できる場を提供し、高齢化社会へ向けて福祉支援、幼児への発達心理、体験型の教育 など研究の波及効果を期待できる。視触覚のインタラクションの研究は、福祉や高齢化社会に新しい触覚情報デザインによるアクセサビリティを社会へ浸透させ福祉社会の意識の向上を図るものである。

## 1.5 本論文の構成

本論の構成は、背景、制作、考察、結論の4つからなる。第1章では序論として研究背景としてアートやデザインなどの触覚表現と工学の触覚研究からこれまでの先行研究や触覚の特性に関する背景、目的、手法など全体の概要を述べた。第2章から6章までは、視触覚ディスプレイの制作をおこなった。第2,3,4章では、人間の温度に注目した温冷感覚呈示ディスプレイの制作について述べた。第5章では、素材を集め形作る触る行為に注目して砂状硬軟呈示ディスプレイの制作について述べた。第6章ではアクティブな毛状触覚に注目し毛状生物感覚呈示ディスプレイの制作について述べた。第7章では視触覚ディスプレイについて全体の考察をおこない、第8章で結論、今後の課題を述べることにする。

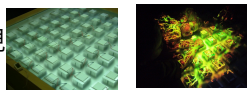
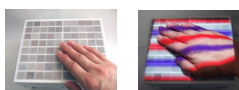
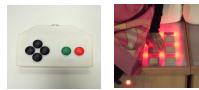
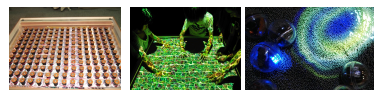
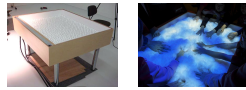
<b>序論</b>	研究の背景	メディアアートとテクノロジーの融合 メディアアートとテクノロジーの流れから研究の位置づけを論じる メディア表現の拡張 メディア表現の拡張の流れから研究の位置づけを論じる 触覚の先行研究 工学分野，福祉分野，デザインからの先行研究を述べ研究の位置づけ 設計方針 開発するディスプレイの基本方針を述べる	1 章
	研究の目的と方法		
	研究の意義		
	論文の構成		
<b>本論</b>	制作 1.		
	温冷感覚呈示大型ディスプレイによる表現の拡張		2 章
	温度特性を取り入れた開発と表現		
	温冷呈示小型ディスプレイによる表現の拡張		3 章
	温度の弁別距離実験をもとにした開発と表現		
	温冷呈示ディスプレイの応用と考察		4 章
	制作 2.		
	砂状硬軟感覚呈示ディスプレイによる表現の拡張		
	ディスプレイの開発と表現		5 章
	ワークショップによる拡張		
	制作 3.		
	毛状生物感覚呈示ディスプレイによる表現の拡張		
	ディスプレイの開発と表現		6 章
	毛状生物感覚呈示の定量化実験		
	<b>考察</b>	第 2-6 章について表現創出を拡張するための効果について 総合的に考察する	7 章
<b>結論</b>	本論文の結論を述べる		8 章

図 1.1 本論文の構成

## 第2章

### 温冷感覚呈示ディスプレイによる表現の拡張

#### はじめに

触覚呈示装置の設計は、人間の触知覚特性に基づいてなされることが望ましい。本章では、温冷提示視触覚ディスプレイの開発にあたり、人間の体性感覚に注目し、温度特性を取り入れた温冷提示視触覚ディスプレイの開発とその表現作品について述べる。

これまでに温冷呈示を制御し体験できるディスプレイのシステムは極めて少なく、インタラクティブに反応することによって参加者に新しい体験が提供できると考え温冷呈示を選んだ。従来技術である視覚のディスプレイに対し、本研究では、表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した温冷呈示を視覚と同一箇所に表現を感受することができるディスプレイ装置を開発した。温冷呈示ディスプレイの制作にあたり、試作19インチディスプレイ、大型ディスプレイを制作し、その制作物を展示した。そこで得られたヒアリングを元に、温冷呈示の定量化の実験をし、その結果をもとに9インチ80ピクセルの小型ディスプレイを制作しそのディスプレイに即した映像コンテンツを連動させてその制作物の展示をおこなった。ここでは、その開発とそれに対応したコンテンツの制作と実装展示について述べ、視触覚ディスプレイの開発と解像度の検討や小型化、使用形状の変化など視触覚ディスプレイから派生する応用とそこから得られた効果やメディア表現の拡張手法に関する知見を論じる。

#### 2.1 温度の体性感覚

体性感覚・内臓感覚は、視覚、聴覚、味覚、臭覚、前庭感覚以外の感覚を指す。体性感覚は、皮膚で感じる表在性の皮膚感覚と骨格筋や腱、関節で感じる深部感覚に分類される。内臓感覚は、胃、腸、肝臓などの内臓で感じられる感覚である。[27]体性感覚および内臓感覚の受容器は、受容する刺激の種類に応じて4種類に分類される。皮膚の触や圧、筋肉の伸縮や緊張など体に加えられた機械的刺激に対応する機械受容器、温冷などの感覚を引き起こす温度受容器、pH など化学的刺激に応答する化学受容器、さらに強い機械的刺激、熱刺激、酸など体に傷害を引き起こす刺激に対して侵害受容器などがある。

皮膚感覚は、外側から内側に向かって表皮、真皮、皮下組織の3層からなる。皮膚感覚受容器は、表皮と真皮の境界から皮下組織にかけて存在し、触覚情報を受容する機械受容器、温度情報を受容する温度受容器、痛覚情報を伝える侵害受容器がある。皮膚の無毛部の機械受容器は、

マイスナー小体，パチニ小体，メルケル触盤，ルフィニ終末の4種類からなり，振動の周波数により刺激する部位が変わることが知られている．

視覚，聴覚の活用を前提にしたインタフェースやデバイス機器の開発研究，視聴覚の感覚知覚に関する研究は，他感覚に比べて進展していると言われている[52]．一方で，皮膚感覚に分類される触覚の活用も徐々に進みつつある．とりわけ，感覚代行の観点から視覚障がい者への支援において触覚が活用されている．具体的には，オプタコンや点字ピンディスプレイ等は知られている．近年積極的に研究が進められている触覚インタフェース・デバイスへの応用という側面においては，力触覚に着目した超臨場感を志向した触覚フィードバックの研究が主流となっているが[34]，温度感覚の活用は今後の研究が期待される分野であると考ええる．

触覚や痛覚と同様に，人間の皮膚感覚の要素的感覚である温度感覚は，対象物に触れることで外部の温度情報を獲得するだけでなく，生体内部環境における温熱因子の受容も行っており，人間にとって非常に重要な役割を担っている[28]．

触覚や痛覚と同様に，人間の皮膚感覚の要素的感覚として捉えられている温度感覚は，対象物に触れることで外部の温度情報を獲得するだけでなく，生体内部環境における温熱因子の受容も行っており，人間にとって非常に重要な役割を担っている．温度感覚については，生理学的及び知覚心理学的な側面からの基礎的性質は明らかにされつつあるが，触覚において近年積極的に研究が進められているインタフェース・デバイスへの応用という側面においては，温度感覚の活用はあまりなされていない．同じ皮膚感覚の中でも温度感覚を活用したインタフェース・デバイスの開発研究は数少ない状況であるが，より多様なインタラクションの実現に向けて，触覚だけでなく，温度感覚等の皮膚感覚の活用法についてもその可能性を検討していくことは重要であると考ええる[53]．さらに温度感覚を提示できることで再現できる触感の種類が増え，臨場感や遠隔通信，VRやロボットなどの触覚インタフェースとしてユーザーの触覚体験やインタフェースの応用の幅が広がると期待できる．ここでは，温冷感覚について，熱のディスプレイ設計のための構成条件や課題を述べる．[54]

### 2.1.1 温度感覚特性

温度感覚受容体の特性を理解することは，温度感覚のディスプレイの効果的な設計に不可欠である．ここでは，温度感覚特性，冷点・温点の数，閾値，温度錯覚，温度と触材，温度と加齢について紹介する．

#### 温度感覚特性 感覚受容器の機能的分類

温覚や冷覚の受容器に対する適刺激は温度刺激である．この受容器は表皮下または皮下組織にあり，組織学的に特殊な構造をもたない自由神経終末である．

温度刺激を受容する自由神経終末のうち，温覚に対応するものを温受容器といい，冷覚に対応するものを冷受容器という．

温受容器は30～50℃程度の温度刺激に感受性があり，35℃で最も興奮性が高まる．また冷受容器は10～40℃程度の温度刺激に感受性があり，25℃でもっとも興奮性が高まる．また43～45℃以

上の温熱刺激は, 侵害受容器の一種であるポリモーダル受容器を興奮させ痛みを生じさせる. [55]

## 冷受容器と温受容器の応答

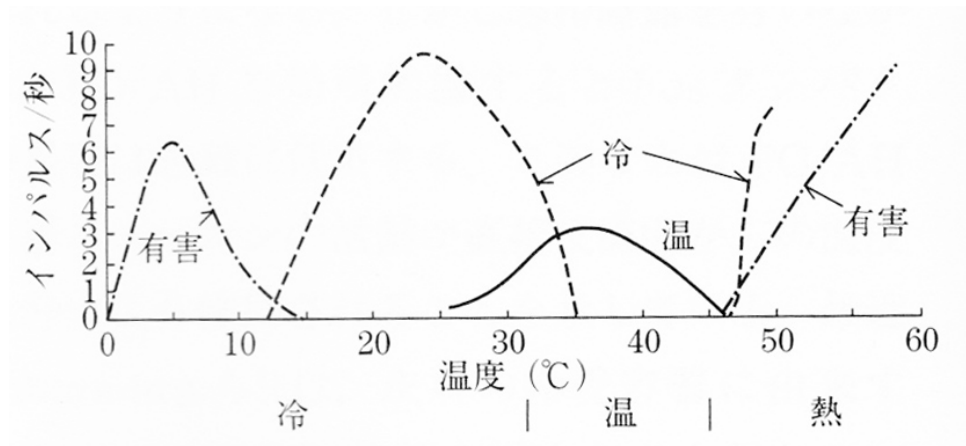


図2.1 皮膚の温度とインパルスのパターン[55]より引用

## 矛盾冷覚

熱いものにふれたとき, はじめに冷覚がおこることがある. これを矛盾冷覚という. これは一部の冷受容器が45℃以上の温度刺激で興奮することによる.

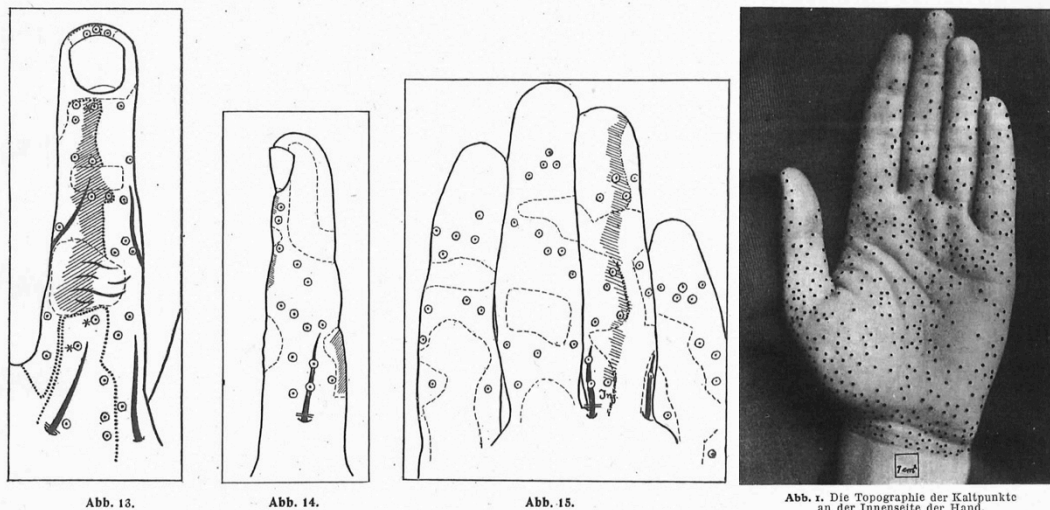
表1 温度感覚の特徴

分類	体性感覚の皮膚感覚に属する
	無感温度 (33℃) 前後では温度感覚はおこらない
	環境温度に影響されやすい
特徴	識別性が低い
	温点よりも冷点が多くある
	矛盾冷覚
順応	20℃～40℃の範囲で順応がおこりやすい
受容器	機能的には 冷受容器 (感受性は 25℃でピーク)
	温受容器 (感受性は 35℃でピーク)
	形態的には 自由神経終末
求心性線維	冷覚: Aδ 線維 III 群線維 (有髄線維)
	温覚: C 線維 IV 群線維 (無髄線維)
中枢内伝導路	外側脊髄視床路 (脊髄視床路系)

## 温点と冷点

皮膚感覚としての温覚や冷覚に関与する感覚点には, 体表面の温度より少し高い温度に反応する温点と, それより少し低い温度に反応する冷点とがある.





(a) 温点の分布 指部[56]

(b) 冷点の分布[57]

図 2.2 人間の手掌側の温度感覚点の分布 出典[56],[57]より引用

温点，冷点：人間の皮膚上に分布する温冷刺激を感じ取ると言われているセンサーで，前腕の温点と冷点の密度はそれぞれ約 $0.24/\text{cm}^2$ ， $7/\text{cm}^2$ [56]) であり，冷点の数・密度とも，温点より4～10倍程度大きく，冷感覚の反応時間のほうが温感覚より速い[57]．また，温冷刺激に敏感である部位とそうでない部位がある． [58]

## 温度知覚の閾値

閾値とは生体に対しある反応を引き起こすのに必要な最小あるいは最大の値である．温・冷覚の閾値は以下の3つの要因によって規定される．

- ① 順応温度：順応温度が低いほど温覚を生起する閾値は高くなり，逆に，順応温度が高くなるほど冷覚を生起する閾値が高くなる．
- ② 温度変化速度：温度変化速度が速いほど温冷覚を生じる閾値は低くなり，体の順応温度が高い状態で温度変化速度がない場合には温感になる．低い状態では冷覚になる．
- ③ 刺激面積：刺激面積が小さいほど温覚のしきい値は高く，面積が大きくなると 閾値は低下する．冷覚に関しても同様である． [59]

皮膚の温度速度に関しては，変化が急激な程温・冷刺激共に閾値が減少する傾向にある．ただし， $0.1^\circ\text{C}/\text{s}$  より急激な温度刺激に対しては閾値が同程度となる．閾値は温度変化が生じる前の皮膚の温度（順応温度）によって変化する[59]．

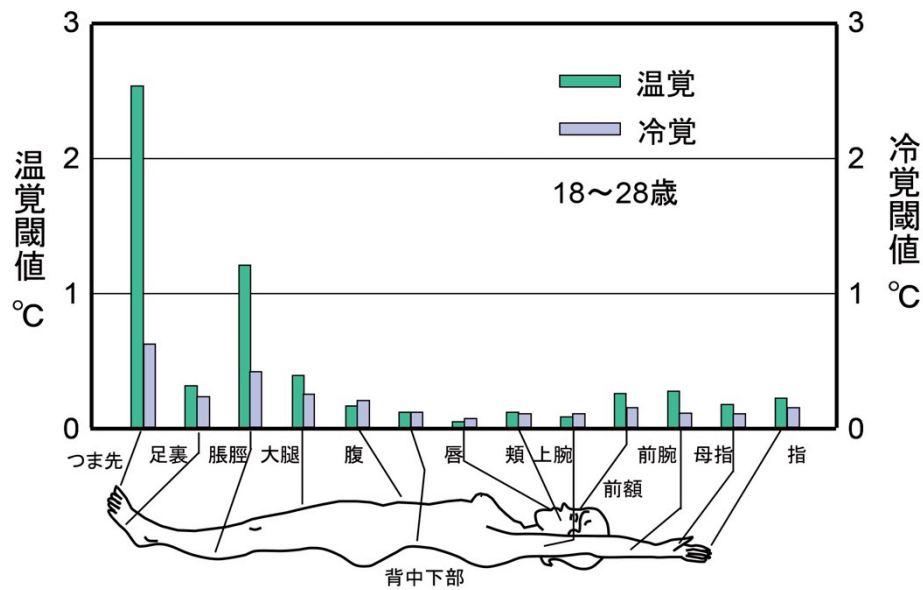


図 2.3 体表部における温・冷覚の弁別閾値Stevens [60]より引用

順応温度が高いほど温刺激の閾値が減少し，冷刺激に対する閾値が上昇する．順応温度が低いほど冷刺激に対して敏感になり，温刺激に対して鈍感になる．[61]温度閾値は刺激面積が広いほど小さくなる傾向にあり，Bergら[62]は温刺激に対しては面積が2倍になると閾値は半分程度になると報告している．同様に，冷刺激に対しては面積が4倍になると閾値は半分程度になる．親指の母指球上での小さな変化に非常に敏感である2点の冷却パルスでは $0.02^{\circ}\text{C}$ - $0.07^{\circ}\text{C}$ ，温暖化パルス内では $0.03^{\circ}\text{C}$ - $0.09^{\circ}\text{C}$ の違いが判別できる．Stevensらの報告[60]では手が熱ディスプレイと接触しているときの状況となる皮膚温度の変化を識別するための絶対しきい値は二つの冷却又は加温パルスの間で区別するための閾値よりも大きい．母指球の皮膚は， $33^{\circ}\text{C}$ に維持されると温暖化の差分閾値は， $0.20^{\circ}\text{C}$  ( $2.1^{\circ}\text{C/s}$ ) 冷却のために，それは $0.11^{\circ}\text{C}$ ある ( $1.9^{\circ}\text{C/s}$ ) である．温度感覚は，圧覚や振動覚など他の触覚に比べ空間分解能が低いとされる．絶対的な温度感覚特性を踏まえて相対的な温度識別特性を生かしたインタフェースの開発が期待される．

## 温度錯覚

触覚の錯覚として，温度による触覚の錯覚をあげる．

サーマルグリルイリュージョンは，皮膚の狭い間隔で温覚と冷覚を同時に感じると，幻痛が生じる，というものである．皮膚に損傷を与えない温度であっても痛覚刺激の生起が可能である．ファントムセンセーションは，皮膚上の2点を振動刺激すると，2点を結ぶ直線上に1つの振動感覚が生じる錯覚現象として知られているが，温度に関しても温度による2点を温度刺激すると，2点を結ぶ直線上に1つの温度感覚が生じる錯覚現象ファントムセンセーションに似た現象が生じることが大原，梶本ら[63]から報告されている．Green[64]は2つの隣接指で受ける熱錯覚を紹介した．

## 温度と触感

常温でウールはせいぜい皮膚温にまでしか上昇していないにもかかわらず、ウールは温かいと感じ、金属は冷たく感じる。触感とは、狭義には皮膚の機械受容器への刺激によってもたらされる感覚のことであるため、温度感厳密には触感の一部ではない。しかし、我々が物体に触れた際に感ずる「触感」は、単に機械受容器への刺激だけで決まる訳ではなく、他の感覚によっても影響を受ける。物体に触れた際に得られる温度感、触感を構成する重要な要素となっている。[65]

物体に触れたときに感ずる温度感、その素材の熱特性により大きく異なる。触材の温熱的特徴は、第一に触材の熱伝導率、第二に触材の比熱に依存する。触材の温度印象の順位関係は、その時の室温とは無関係である。

## 温度と情動

温度感覚は人間の情動にも影響することが指摘されており、Williams ら[66]は、物理的な温度が心理的な感情を増幅させることを報告している。Auliciems ら(1981)[67]は、温度知覚の心理・生理学的モデル傾向を以下のように述べている。室内の温度必要条件に対する提案が、伝統的仮説における言語化のレスポンスで基礎付けされた。伝統的仮説とは以下の3つである。(1)最少の熱処理機能は、最大主観的容認性に等しい。(熱処理の自覚度)(2)感覚と不快レベルは同義である。(3)温度知覚は、温度刺激の排他的機能であり、心理的反応である。

## 温度と加齢

温冷感覚特性と加齢効果について、加齢によって温冷感覚閾値の部位差があることがわかっていく。内田ら[68]やStevens ら[60]の先行研究において、加齢により手を含めた全身の温冷感覚閾値低下は部位差があると報告されている。Mower[69]は深部体温の高低によって温冷感覚は変化しないと報告しているため、呈示する刺激によって温冷感覚も規定されると考えて良いであろう。温冷感覚特性と加齢効果の関係は、高齢化社会の現代において温冷感覚を利用したディスプレイやゲームコントローラ等へ温冷刺激を活用する場合には有用なデータとなるであろう。

### 2.1.2 温度感覚ディスプレイの実装上の課題

温度感覚をディスプレイやロボットなどのインタフェースに実装することを考えた場合、人間の温度感覚の特性と温度呈示の反応速度と呈示機構を制約条件の基でいかにバランスをとれるかに集約される。ここでは課題とそれを解決する為の研究や実装の例を紹介したい。

## 温度呈示方法

熱電モジュールとして知られているペルチェ素子は、熱ディスプレイにおいて最も広く使用されている。ペルチェ素子は、2種類の金属の接合部に電流を流すと、片方の金属からもう片方へ熱が移動するというペルチェ効果を利用した板状の半導体素子である。直流電流を流すと、一方の面が吸熱し、反対面に発熱が起こる。電流の極性を逆転させると、その関係が反転し高精度の温度制御に適している。複数重ねることで熱の移動量を増やすことができる。[70]

装置の体積が小さく装置の小型化が容易というメリットがあり、騒音・振動は発生しないが、移動させる熱以上に、素子自体の放熱量が大きいので、冷却メカニズムとしては電力効率が悪いという欠点がある。吸熱側で吸収した熱と、消費電力分の熱が放熱側で発熱するため、ペルチェ素子自体の冷却をいかに効率よくするかが温度感覚ディスプレイの性能に大きく影響する。冷却には排熱側にヒートシンクとファンを使用して冷却を行なう。実装コスト、消費電力、メンテナンスなどを考慮すると、デバイスの小型化や最適化などの課題がある。

## 温度の反応速度

温度感覚の提示において、その時間応答性が問題となる。モノに接した時に皮膚表面に瞬間的に急激な温度変化が生じる。温度感覚の提示機構としては、この温度変化を再現できる高い応答性が求められる。

高速化のための工夫として、人間の温度感覚の知覚特性を利用し、高速な温度感覚提示を実現する手法に着目すると、秋山ら [71]は、皮膚の順応温度を調整することで、温・冷 両刺激に対して温度提示を高速化できることを示し温刺激と冷刺激をマトリクス状に配置した温度提示ユニットを提案している。佐藤、前野[72]は、閾値が順応温度に依存する、空間分解能が低い、という2点に着目し、温刺激と冷刺激を空間的に分割し、順応温度を調整することで、従来の温度提示手法より温度知覚時間が短縮することを、実験により確認した。

遠隔地への温度の触覚伝送の試みとして、佐藤ら [73]は、空間的に分布する圧覚と温度感覚を同時に提示することで、遠隔地のモノの形状や材質の再現を試みている。その知見を遠隔地で動くロボット TELESAR V に温度を伝送できるシステムを搭載している。

## 温度感の再現

物体に触れたときに感ずる温度感は、その素材の熱特性により大きく異なる。そのシミュレーションや実物体での提示方法を紹介する。

Citerinら[74]は、導電性（アルミニウム）からの非導電性（ポリスチレン）に至るまで、様々な物質との接触の間に交換測定し、その熱モデルから派生した理論的予測と比較し、彼らのモデルが正確に材料の熱応答をシミュレーションすることができたことを確認した。同様の結果は他 Benali – Khoudja[75]からも報告されている。

山本ら[76]は、対象と接触後の指先の温度変化を再現することで、金属や木材などの材質感を再現している。指が物体に触れると、熱感、接触の瞬間に起こる指先での急激な温度低下があり、熱触覚ディスプレイにおける仮想物体のリアルな熱レンダリングには、接触時点での温度低下を正確にシミュレートする必要がある。接触の瞬間における熱感覚を再現するためのサーマル触覚ディスプレイを制御する方法を提案した。井野、伊福部ら[77]は、ペルチェ素子を用いて物体接触時の皮膚温度変化パターンを指先に模擬してやることで、金属や木材のような材質感を提示するディスプレイ・インタフェースの開発を行った。鉦山ら[78]は、水で濡れた物体表面に触れているかのような濡れ感の提示に関して、指と物体間の熱流量変化及び指の接触面積変化に着目して評価を行った。このように、リアルな触材を再現したり材質感を再現する研究は認知心理学、物理学被服学など多分野で行われており、横断的な研究によって明らかにされることが期待される。

### 2.1.3 将来の展望

温度感覚の特性にあった温度呈示インタフェースの効果的な設計に特有の課題があるが、他の触覚に比べ研究が立ち後れているのが現状である。

視覚や聴覚などの感覚モダリティーとしての温度触覚についての知見や温度触覚による感覚代行についての研究は今後が期待される。日常生活への応用としては素材や空間、環境と温度感覚に関する研究は心理、医学、建築、都市工学、生態系など複合的な分野との知見の交流が必要である。温度感覚に関する一層の発展を期待したい。

### 2.1.4 考察および結論

本章では触覚呈示ディスプレイの制作にあたり、人間の触覚特性にあったディスプレイの仕様の決定のために人間の触覚特性の役割や応用例について調べた。特に触覚特性のうち、これまであまりまとめられていなかったメディア表現やインタフェースにおける温度感覚についてとりあげた。温度感覚においては閾値が順応温度に依存し、空間分解能が低いなど、人間間の特性を生かした温度呈示方法を考慮した開発が必要だということを示した。

一方で、触覚において近年積極的に研究が進められているインタフェース・デバイスへの応用という側面においては、温度感覚の活用はあまりなされていない。皮膚感覚インタフェースは、視覚や聴覚によって得られる情報の補完、計算機・通信のための入力デバイス、遠隔手術などの遠隔操作や仮想物体操作の支援を目的として開発されることが多いが、そのほとんどは力覚や圧覚、振動覚を活用したものである。また、皮膚感覚を活用したバーチャルリアリティ技術の確立も盛んに行われてきているが[79]、力覚や振動覚に着目し、リアルな触覚フィードバックの実現を志向した研究が主流となっている。このように、同じ皮膚感覚である温度感覚を活用したインタフェース・デバイスの開発研究は数少ない状況であるが、より多様なインタラクションの実現に向けて、力覚や振動覚の触覚だけでなく、温度感覚等の皮膚感覚の活用法についてもその可能性を検討していくことは重要であると考えられる。

## 2.2 温冷感覚呈示大型ディスプレイの制作

温度感覚のインタフェース・デバイスへの応用について、前野ら[71]の人間の温度知覚特性を利用した温度呈示手法の検討や梶本ら[80]の前腕部への触刺激に対する温度感覚の重量の研究、また小林ら[81]らの温度覚による触図表現「温感触図」などがある。井野ら[77]は、ペルチェ素子を用いて物体接触時の皮膚温度変化パターンを指先に模擬してやることで、金属や木材のような材質感を呈示するディスプレイ・インタフェースの開発を行った。また、高山ら[78]は、水で濡れた物体表面に触れているかのような濡れ感の呈示に関して、指と物体間の熱流量変化及び指の接触面積変化に着目して評価を行った。中茂らは、画像や文章と温度刺激をあわせて提示することで、その画像や文章から受ける印象を変化させることができる「ひやあつまウス」を開発している[82]。宮下らはピアノに冷温感覚提示装置を取り付け、鍵盤の温度を動的に変化させることで、温度を媒介として打鍵後に助言をおこなう即興演奏支援システムを開発している[83]。鳴海、廣瀬らは冷温感覚の提示によって行動誘導させるシステム「Thermotaxis」[84]を提案し、ウェアラブルデバイスを通じて冷温感覚を提示することで人々の空間中での一夜振る舞いに影響を与えることが出来ることを明らかにしている。

しかし、温度感覚を活用したインタフェース・デバイスの開発研究はまだまだ少ない。著者のこれまでの作品や [85,86] 2004年からのタッチパネルディスプレイを使用した作品[87,88,89] を体験時の視覚と触覚の違和感から、これまで十分に活用されてこなかった温度感覚を用いたインタフェース・デバイスの開発研究を手掛けていきたいと考えている。具体的には、温度可変素子（ペルチェ素子）を格子状に配置することで、実現できていなかった手掌部への面的な広がりをもつ温度感覚を呈示するディスプレイ・インタフェースの開発を目指す。この開発が実現すれば、温度感覚を用いて異なる面的なパターンの刺激を手掌部に呈示することができる。温冷呈示がインタラクティブに実装できることによって参加者に新しい温冷感覚の体験を提供できると考えた。ここでは、まず温冷感覚をインタラクティブに表示できるディスプレイの開発についてのべ、次にそのディスプレイを使用した作品「Thermoesthesia」（サーモエステシア）[90]について紹介し、新しい感触表現の制作支援を目的とした触覚ディスプレイの開発がもたらした成果について述べる。

### 2.2.1 システム

本研究の視触覚感覚呈示ディスプレイの開発にあたり、インタラクティブな視覚の切り替えが可能でありかつインタラクティブな触覚感覚が呈示でき、画面を触ったところの視覚と触覚呈示が対応していることを4,5,6章の共通要件としている。それぞれのディスプレイで触覚呈示する素材により使用する機構を変えている。

#### 2.2.1.1 システム構成

本章では、開発したペルチェ素子を使用した温冷呈示ディスプレイを説明する。温度感覚ディスプレイの基本構造を図2.4に示す。これはプロジェクターよりスクリーンに映し出された画像に合わせて、スクリーンそのものの温度が変化するディスプレイである。温冷呈示には図2.5のようなペルチェ素子を使用する。温冷呈示の手法として空冷や水冷、ヒーターを用いる

第2章 温冷感覚呈示ディスプレイによる表現の拡張 20

方法などあるが、温冷が一画面で呈示できるため温冷感の表現にはペルチェ素子を使用している。ペルチェ素子とは熱電冷却素子を複数接続したもので、ペルチェ素子に直流電流を流すことにより、一方の面が冷却し、もう一方の面が加熱する。[91]プログラムによって、冷却、加熱面の切り替えが可能である。スクリーンの裏側にペルチェ素子を接触させることで、スクリーン面の温度を変化させる。また、タッチパネルにより、スクリーンに触れた位置、時間を検出し、それに合わせて画像及び温・冷の温度が変化する。

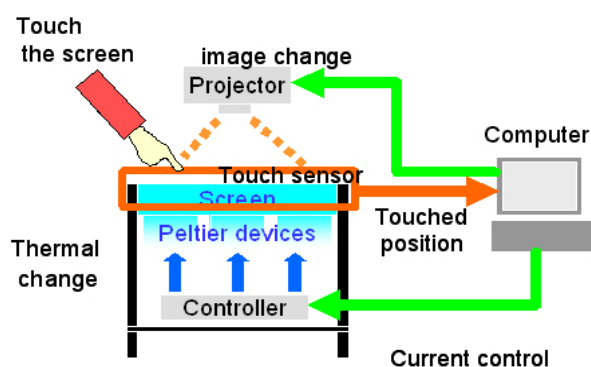


図 2.4 システム構成

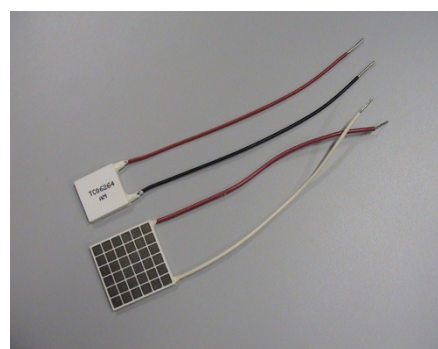


図 2.5 ペルチェ素子

筆者らはまず2006年に図2.6,2.7のような4mm×4mm角のペルチェ素子(TEC1-12708)を3×4の12個配置した19インチを制作した。次に2007年に図2.8,2.9のようなテーブル状50インチディスプレイの上部に4mm×4mm角のペルチェ素子(TEC1-12708)を8×10の80個配置した10cmの深さのあるディスプレイを制作した。人間は視野角20度を境に臨場感が増し、約80度から100度で満足し、視野角110度で飽和するとされる。このことから、没入感を得るためのサイズとして50インチディスプレイを選定した。体験できるディスプレイのサイズの拡大により、体験者の視野角が広がり、没入感のあるシステムになると考えた。制作に当たって、搬送時の重量と丈夫さを考慮し躯体の内部はアルミフレームで補強し、木製の躯体を制作した。可搬性を改善しディスプレイ部分と足が分かれ、専用の運搬ケースで搬送できるよう工夫した。画面縁に設置された光学式タッチパネル（㈱イーアイティー，XYFer）で接触位置を検出し、位置情報がCG画像生成とペルチェ素子の機械制御に同時に送信されることによって、画像と触覚の連動したインタラクションを実現させている。

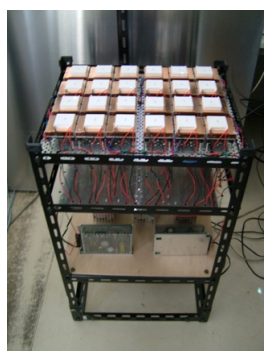


図 2.6 19インチ温冷呈示ディスプレイ内部

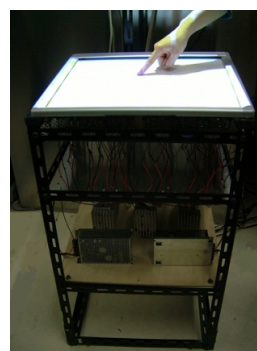


図 2.7 タッチパネル使用時の温冷呈示ディスプレイ





図 2.8 保護板なしの 50 インチ温冷呈示ディスプレイ



図 2.9 銅板使用時の温冷呈示ディスプレイ



図 2.10 保護板なしの温冷呈示ディスプレイ部材

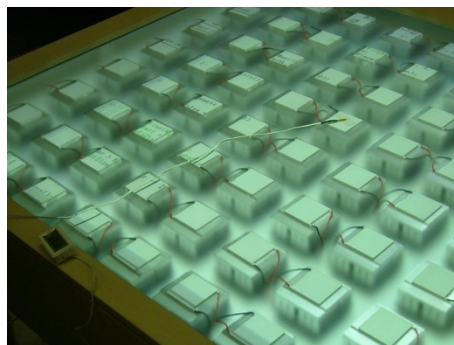


図 2.11 アクリル板使用時の温冷呈示ディスプレイ

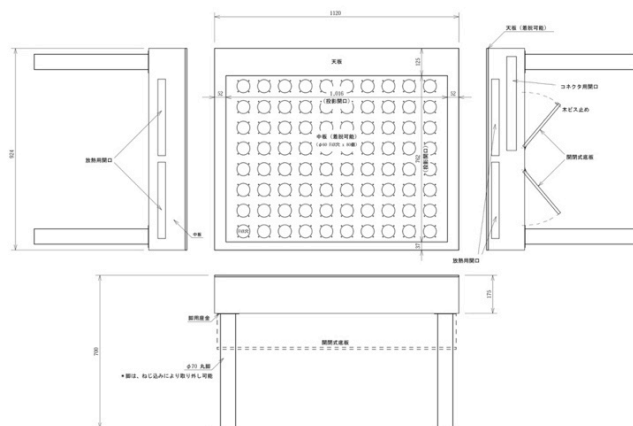


図 2.12 50インチ温冷呈示ディスプレイ側面図

### 2.2.1.2 ディスプレイ表面の加工

ペルチェ素子上部に図 2.11 のような半透明で表面を無光沢処理した 3mm 厚のフロストアクリル板を設置した. 直接ペルチェ素子に触ることによるペルチェ表面の汚れ防止や図 2.10 のようなヒートシンクなどの部品への保護とディスプレイの上に乗るといった体験者の体験方法を想定しアクリル板でカバーをした. アクリルの熱伝導率は  $0.17\text{--}0.25\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  であり, 銅 398 などの金属に比べ熱伝導率は低いがアクリル板の厚みを検討することで温度体験が可能となると考えた. 当初図 2.9 のような銅板に白いカッティングシートを接着したものを使用し試作をしたが,



視覚効果として内部のペルチェ素子を含め構造が透けて見え、かつスクリーン面に映像が投影される効果を優先し 3mm 厚のフロスト処理したアクリル板の使用とした。80 個のペルチェ素子から構成されるスクリーンは、画面の温度を個々に制御でき 80 分割することが可能である（図 2.12）。

### 2.2.1.3 制御方法

温冷呈示の制御方法として、ペルチェ素子 4 個を 1 グループとして 8 bit のデータでグループごとに制御する。グループを指定するため 7 bit を使用する（128 グループ指定可能）。指定されたグループのデータをドライブ回路側で保持させる（1 bit 使用）。合計 16 bit の出力で  $4 \times 128 = 512$ （個）のペルチェ素子を制御できる。またノート PC での制御も可能なように USB を使用したデジタル I/O とした。以上により全体にかかる消費電力、使用コスト、重量が減り、より利便性の向上が得られた。また、システムの安定によって、様々な多くの観客に展示物の体験が長期間に渡り可能となった。

### 2.2.1.4 温度性能測定

ディスプレイの表面に図 2.13 のように温度計を接地させ最高/最低温度と速度に関する温度性能測定を行った。図 2.14 にグラフを示す。暖かい温にした場合は平常温度から電源が入り急速に温度があがり、100 秒で  $+16.0^{\circ}\text{C}$  になり 200 秒で最高温度の  $+17.2^{\circ}\text{C}$  に達した。その後電源を切りにすると 50 秒で  $-12^{\circ}\text{C}$  の温度変化が計測された。ここでの最速温度変化は電源入と切る直後の  $4.1^{\circ}\text{C}/\text{s}$  であった。冷温にした場合は平常温度から電源が入り急速に温度が下がり、100 秒で  $-10.5^{\circ}\text{C}$  になり 150 秒で最低温度の  $-11.1^{\circ}\text{C}$  に達した。その後電源を切りにすると 50 秒で  $+10^{\circ}\text{C}$  の温度変化が計測された。ここでの最速温度変化は電源入と切る直後の  $5^{\circ}\text{C}/\text{s}$  であった。これは、他の振動などの電気刺激の応答速度に比べインタラクティブな反応速度は遅い。本ディスプレイをインタラクティブな作品として使用する際、急速な温度変化に対応が厳しい特性を生かしたコンテンツの制作とそれに対応する温度制御をする必要があると考えた。そこで、冷温には雪や氷といったわかりやすい画像、暖かい温度には生命感を溢れる植物の成長や燃える炎の画像を生成させた。

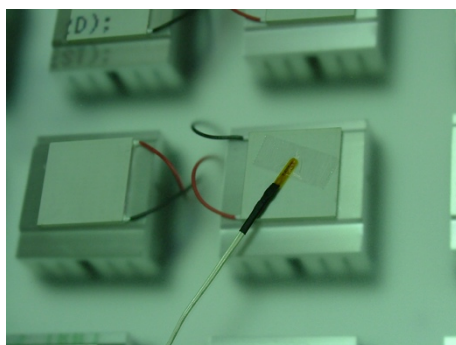


図 2.13 温度性能測定

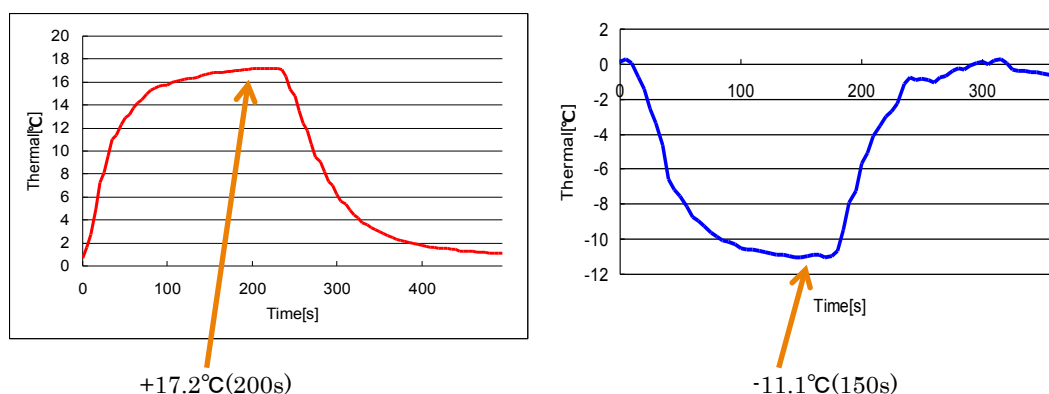


図 2.14 温度変化実験

## 2.2.2 画像生成

### 2.2.2.1 イベント部

イベント部は、タッチパネルの情報を基に、位置、形状を抽出し、雪の結晶の生成に最低限必要な情報を絞り込んで、画像生成部に送信する。同時に音声出力の指示も行っており、システムの基幹として全体の統括を行っている。温度制御と連動させ、1 個1 個のペルチェ素子の温度と画像がインタラクティブに対応するようプログラムされている。

### 2.2.2.2 画像生成部

画像生成部では、イベント部から送信された情報を基にOpenGL®に雪の結晶の形状生成、氷の生成、植物成長アニメーションを高速リアルタイムに行っている。まず、雪の結晶は「中谷ダイアグラム」図2.15[92]を参考に気温と気象条件のパラメータである水蒸気量を変化させながら、図2.16、図2.17のような六角形に近いものから枝の成長したものまでさまざまな雪の結晶を作った。タッチパネルに接触する時間が長いと大きな結晶を生成するよう雪の結晶の形状を変化させた。画像は、雪が上空から降り地面に積もるように、ディスプレイ上部から雪の粒が落ちてき、その粒に触れると、雪の結晶が開くように設定されている。(図2.18)雪の結晶とペルチェ素子の冷温が同期し結晶が開いた位置のペルチェ素子が物理的に冷たくなるようプログラムされている。開いた結晶は、雪が地面に積もるようにディスプレイ下部に積もっていくので、ディスプレイ下部は画像に同期し実際に冷たい触感を得ることができる。結晶が開くことがわかるように涼しげで花開くような音が付けられている。

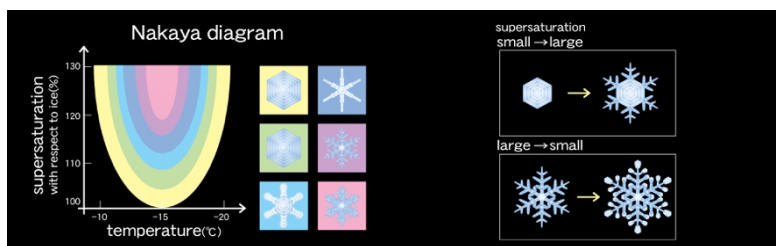
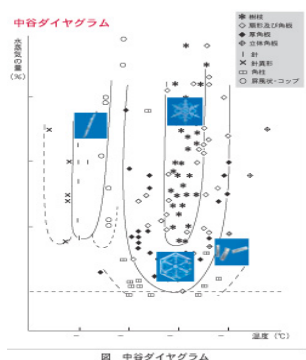


図2.15 中谷ダイアグラム (Nakaya, 1954: Snow crystalsより引用)

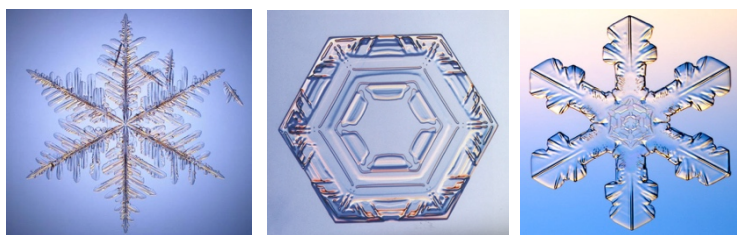


図2.16 Snow crystals photos , Kenneth G. Libbrecht, Snowcrystals[93]より引用



図 2.17 Simulation of snow crystals growth

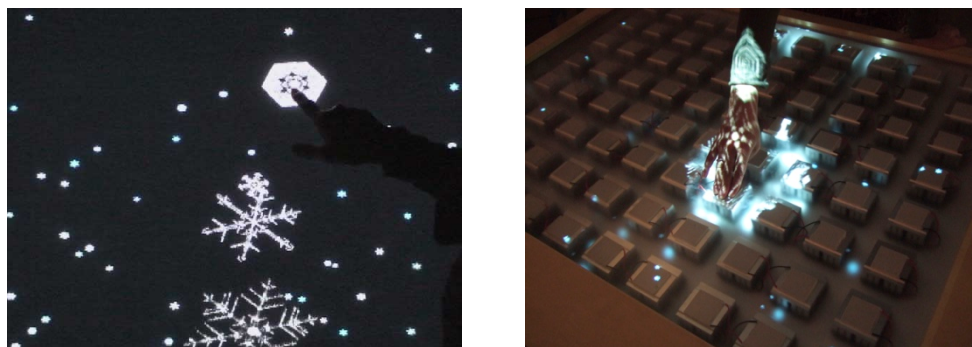


図 2.18 Ice crystals photos

2つ目のコンテンツとして図 2.19 のような氷が張る様子を直線的な枝の成長のシミュレーションを応用して図 2.20 のような CG 画像を生成した. 氷の CG 画像はディスプレイに触った場所に描画され, 観客はディスプレイ上で氷のドローインをするような体験ができる. 触る速度によって速度が遅い場合は細かな樹氷になり, 早い速度で触ったときは, 大きな樹氷が生成させるように計算した. このことで, 観客が色々なスピード感で描画を楽しむことができる. ドローイングした氷の位置とペルチェ素子が同期し冷温を呈示するようプログラミングされ, 図 2.21 のように

第 2 章 温冷感覚呈示ディスプレイによる表現の拡張 25

冷たい氷をドローイングできる体験を提供した．氷が張るようなピキピキとした音もインタラクティブに付けられている．



図 2.19 Ice crystals photos

Kenneth G. Libbrecht, Snowcrystals[93]より引用

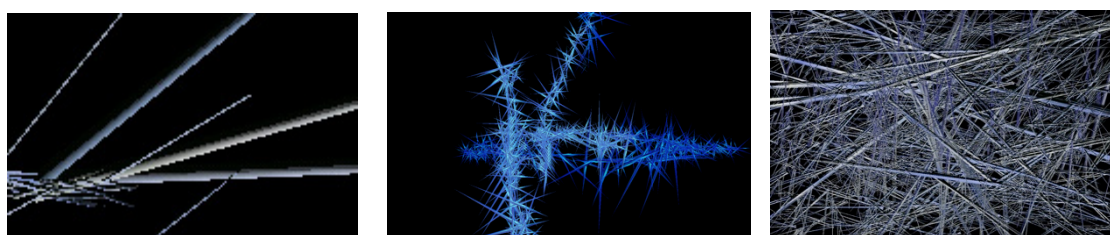


図 2.20 Simulation of Ice crystals growth



図 2.21 Simulation of snow crystals growth

3つ目の暖かい温度の映像には, 図 2.22 のように植物の萌え立つイメージをシミュレーションした．植物の成長のアルゴリズムを使用し, ディスプレイに触ったときに指先から炎のような植物が一斉に生まれる図 2.23 のような映像をリアルタイムで生成した．ドローイングした赤い植物の位置とペルチェ素子が同期し暖かい温度を呈示するようプログラミングされ, 図 2.24 のように炎のように萌える植物をドローイングできる体験を提供した．植物が萌え立ち成長するようなモアモア音もインタラクティブに付けられている．





図 2.22 植物

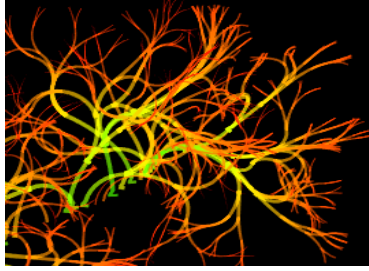


図 2.23 シミュレーション映像

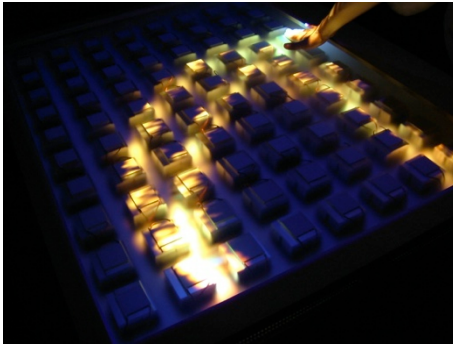


図2.24 50インチ温冷ディスプレイに投影した映像

### 2.2.3 表現

映像と駆動部分の特性をいかに融合させてコンテンツを提供するかが、表現の重要な工夫点となる。

雪バージョンは、雪の粒を触ったときに雪の結晶が開き、その位置のペルチェ素子が冷温を呈示するようプログラミングしている。雪の視覚的な効果と冷たい触感を一致させることで、雪の降り積もるイメージを増幅させている。

氷バージョンは、ドローイングした位置のペルチェ素子が冷温を呈示するようプログラミングしている。氷の視覚的な効果と冷たい触感を一致させることで、映画「アナと雪の女王」のようなアクティブに氷のドローイングができる体験を増幅させている。

植物バージョンは、ドローイングした位置のペルチェ素子が暖かい温度を呈示するようプログラミングしている。植物が萌え立つ成長のシミュレーションは人により植物に見えたり、炎のように見えたりし、暖かなイメージと暖かい触感を連動させることで、一層体験を刺激している。また、ディスプレイにかざされた手の甲や腕に投影された映像は血管のようにも見え、体験者に映像の面白さを提供していた。画像と駆動部分の動きの違いを出しかつ体験者を飽きさせないために3種類のコンテンツが2分おきに自動的に変わるようにプログラムした。

半透明で表面を無光沢処理したアクリルの使用により、ペルチェ素子とヒートシンクが表面から透けて見え、かつ部品の接地面とアクリル表面にレリーフ状に2重に映像が投影されることで、平面の映像とは違う、半立体の映像を得る効果を演出している。

図 2.14 で示したように温度が上がりにくい本ディスプレイの特性を映像イメージで温度の変化を補完している。また、同じ温度に長時間呈示をすると結露や暑くなりすぎることを回避するために、一定時間経過すると映像と連動したペルチェ素子の駆動部分を停止し、体験者の安全と駆

動部分に負担をかけない安定した長期展示を可能にした。

## 地球温暖化をシミュレーション

画像生成部では、自然をモチーフにしたシミュレーション画像に加え、気象庁の気象研究所気候研究部第四研究室の協力により、MRI-CGCM1による地球温暖化をシミュレーションした画像コンテンツの制作を行った。二酸化炭素を1985年での濃度を基準として、年率1%で増加したときの地球温暖化シミュレーションを70年先まで行ったもので、シミュレーション開始年を基準として、2年毎に計算されており、温度上昇が見られないところを黄色に、上昇するにつれて赤に近づき、下がるにつれて青に近づくように表現されている。温度制御と連動させ、1個1個のペルチエ素子の温度と画像がインタラクティブに対応するようプログラムした。

### 2.2.4 メディアセンターでの展示

表現の楽しさや科学技術の面白さを考える場として、体験型の科学技術館やメディアセンターが注目されている。1969年にスタートしたハンズオン「手にとって触れる」ことができるサンフランシスコのエキスポトリウムをはじめ、1979年から開催されているメディアアートの祭典「アルスエレクトロニカ」のメディアセンターとして1996年に設立されたアートと科学技術の融合を目指したアルスエレクトロニカ・センターなど、現代のメディアセンターは科学の振興のみならず地域における文化の創生や地域産業インキュベータとしての役割を担っている。

そこでのアーティストや科学技術者の役割も研究室での基礎研究とは異なった視点での開発が求められる。体験者の立場になり、初めて体験したときの面白さ、分かりやすさ、気持ち良さや、何度も体験してもらうための工夫が必要になる。展示品としての耐久性、安全性が必要な条件となる。公共の展示物としてのアクセシブルなインタフェースであること、体験時間を考える必要がある。また何度も体験してもらうための工夫が必要になる。例えば体験者が自ら何かを発見できる喜びの余地を残すなど、遊びのようなエンターテインメントの要素と先端技術の面白さを伝えるためのバランスが必要になると考える。

本作品の展示を2006年アメリカでのCGとインタラクティブ技術の国際学会であるACM SIGGRAPH[90]、2007年オーストリアでのメディアアートの国際展であるアルスエレクトロニカ・センター（図 2.25）[94]での1年間常設（図4-26）、フランスでのバーチャルリアリティの学会であるLavalVR（図2.26,2-27）[95]、日本バーチャルリアリティ学会や日本科学未来館、2007～2010年大阪科学技術館（図 2.28）での常設展示、2010年よりつくばエキスポセンターで常設展示、首都大学東京日野キャンパス玄関6ヶ月間の常設展での長期にわたる展示を行った。実験段階から一歩進んで最高峰の国際学会やフェスティバスに採択され評価された点や一般観客が体験する長期展示や科学館でのコレクションなど、多様な場所で公開し成果をあげているから拡張する試みは成功であったと考える。

### 2.2.5 体験者の観察

国際学会では、温冷呈示ディスプレイの技術と表現の新規性を高く評価され採択された。専門分野の体験者からのコメントとして、温冷の応答速度と人間の感覚についての質問があり定量的な実験の必要を感じた。また、どこまで解像度を上げることが可能なのかについての質問があり、ペルチェ素子を使用したピクセル間の間隔や最適な解像度は次章の課題とした。躯体に対応したコンテンツの描画スピードについては高評価であり、体験としても描画方法が適切であったことが観察された。

アルスエレクトロニカセンターでの1年間の常設展示、大阪科学技術館の2年間の常設展示、つくばエキスポセンターでの7年間の常設展示では、10:00-17:00の開館時間中常に稼働させておく必要があり、安定しかつ安全に展示を実施させた。安定して可動させた工夫として、頑丈で、メンテナンスを考慮した躯体設計や落雷などで電源が落ちた時のデータ保護対応、専門知識がなくても容易にスタートアップが可能な躯体とソフトウェアの立ち上げなどが配慮され、操作マニュアルが用意された。

一般への展示時インタラクションを伴う作品の体験者の触り方について観察すると、ディスプレイの触り方は、Gibsonの触知状態の分類からすると、最初は、手指も物体も静止している受動的触知 **Passive Touch**であるが、徐々にディスプレイ全体を触る手指を動かし、物体は静止している能動的触知 **Active Touch**に変わってくる。S. J. Lederman & R. L. Klatzkyらの触運動知覚動作の分類では**Static Constant**(接した状態で静止)となる。

体験方法について説明を加えた時と加えない場合の体験者の反応を観察した。説明をした場合、体験者は、あらかじめこのディスプレイがどのようなインタラクションを起こし、変化するのか予想をしながら体験する。実際に映像が反応し、物理的にもディスプレイそのものの温度が変化すると、予想していたにもかかわらず、予想外に冷たい呈示に驚く姿を見ることができた。暖かい温呈示よりも冷温呈示の方がより強い反応があった。

体験方法について説明をしない場合どのようなインタラクションをする作品なのか自分で不思議さや楽しさを見つけ出そうとする体験者の姿勢が見られる。電子部品が配置された半透明のディスプレイを見て、何らかの仕掛けがあることを予想する。氷や植物の映像時は手を触れた場所から描画されるので、画像に関しては容易にインタラクションを見つけることができる。雪粒に触る映像時は、どのようなインタラクションで反応がおきるのかわからず、闇雲にディスプレイを触るが、偶然雪粒に触れた時に結晶が開くので、それを手掛かりとして雪粒に触れた時に映像がある法則で変わることに気がつく。温度呈示に関しては、指先のみで触るよりも手のひら全体でディスプレイを撫でその場所の物理的な温度も変化することに徐々に気がつきはじめる。映像と温冷呈示のインタラクションに気がついた体験者は、自らそれが正しいか実験し、没頭した体験をしたり、仲間の体験者にどのようなインタラクションをする作品なのかを説明したりする姿が多く観察された。子どもたちは、国籍を問わず、本ディスプレイに対し身体全体を使用して体験する傾向があり、温冷呈示の体験に驚き、テーブルの上に体を乗せたりしダイレクトに楽しんでいる姿をよく見かけた。躯体の丈夫さとアクリルのカバーによって子供がディスプレイ上に体を乗せても安心して展示を継続することができた。

1人で、数十分も没頭して体験する姿も頻繁に見られた。人間は視野角約80度から100度で臨場感が満足し、110度で飽和するとされる理由から剪定した50インチディスプレイは効果があったことがうかがえた。体験できるディスプレイのサイズの拡大により、体験者の視野角が広がり、没入感のあるシステムになった。反面、複数で体験する場合、今回のタッチパネル方式は多点対応ではないためインタラクションの理解に混乱を生じさせた場面もあった。3つのコンテンツをループで体験できることで、映像と対応した温度の違いや触る方法の違いを飽きることなく体験できていた。美しいという感想も多くいただいた。年齢、性別、言語、障がいなどのハンディにかかわらない体験者層が見られグローバルな交流コミュニケーションとして場を活性化させた。



図 2.25 リンツ，アルス・エレクトロニカ・センター2006年

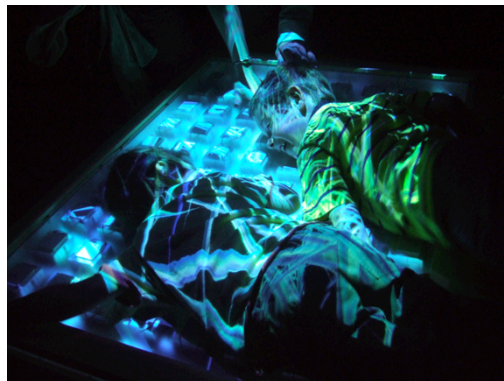


図2.26 Laval VR 2007年4月

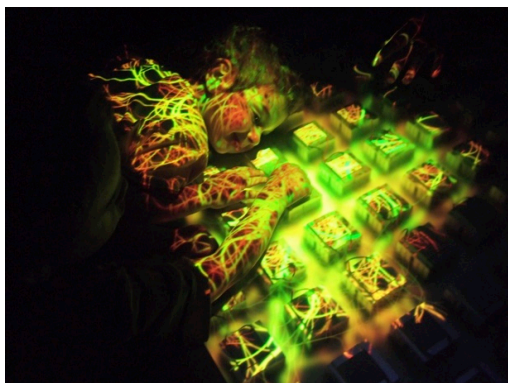


図2.27 Laval VR 2007年4月



図2.28 大阪科学技術館にて 2007年7月

科学技術振興機構戦略研究推進事業「デジタルメディア作品の制作を支援する基盤技術」領域さきがけ研究の協力により研究された。

特許申請： 特許2006-197419号 国際特許

プログラム協力： 笹田晋司，北澤亨斎，田村元嗣

## 2.2.6 考察

温冷呈示にペルチェ素子を使用した温冷呈示ディスプレイ展示時の体験者の観察から温度体験とりわけ冷温体験に驚いたことについては、第1章で調査したように、人間の手掌の冷点の密



度が温点より多いことが考えられる。また、普段の生活において、冷温を触る場面を考えると冷蔵庫など冷たいものを触る時には想定したイメージがあり、想定していない場所での体験やその感覚が予想を超える時に驚きを得られるのではないかと考えられる。

本開発の温度呈示速度は、ゲーム機に使用するような反応速度を持っていない。にもかかわらず、温度の変化のインタラクションを感じ取れた要因として、温度と映像や音の合致するイメージを制作した工夫や初期温度呈示を速くし持続させる温度の制御方法の工夫がある。また映像を使用した本間らの鏡を使用したラバーハンドイリュージョン実験のように、映像のイメージで触感がつられることも考えられる。冷たい映像やそれにあった音を呈示すると触覚も冷たく感じられる。物理的にも冷たくすると、実温度より増幅されより冷たく感じるができることと考える。すなわち、映像や音が加わった温度触覚刺激は、少ない温度変化で効果を得ることができるのではないかと考えられる。それゆえに体験者は予想より冷たく感じ驚いた様子が観察されたと考える。映像や音と温度触覚刺激の関係は、今後詳しいデータの取得が必要に思われる。

温冷呈示ディスプレイの解像度に関しては、格子状にペルチェ素子を配置するのに際し、ペルチェ素子同士の間隔が 25mm 空いている本ディスプレイでは支障なく温度の違いを弁別することができた。しかしながら小型で密度の高いディスプレイを制作する場合、その程度の間隔を空けてペルチェ素子を配置すれば隣り合う温度刺激が異なる温度刺激として識別可能であるかについては明らかになっていない。これについては次章で実験をおこなう。

### 2.2.7 結論

本結果から、ディスプレイに触った部分の映像と温冷呈示を仕様に即しインタラクティブに連動できる温冷呈示ディスプレイのシステム技術を開発できた。使用し映像と温冷呈示を同時に連動させたメディア表現が可能であり、参加者にこれまで体験したことがない驚きの温冷感覚を提供できることがわかった。また、80ピクセル50インチサイズのディスプレイの解像度にあった抽象的な画像や画像の補助的な温冷呈示情報は可能であるが、もっと高密度な文字情報などを伝達するまでには至っていない。そのためには手掌部の温度感覚特性を定量的に評価し、温度感覚を識別することのできる適切な温度刺激の間隔について実験する必要がある。温度感覚ディスプレイ・インタフェースを設計するにあたり、次章で温冷呈示の定量化実験を行うことにした。

## 第 3 章

# 温冷感覚呈示小型ディスプレイによる表現の拡張

### はじめに

第 2 章ではこれまで十分に活用されてこなかった温度感覚を用いたインタフェース・デバイスの開発研究を手掛け、温度可変素子（ペルチェ素子）を格子状に配置することで、実現できていなかった手掌部への面的な広がりをもつ温度感覚を呈示するディスプレイ・インタフェースの開発を目指し、温度感覚を用いて異なる面的なパターン of 刺激を手掌部に呈示することができた。しかし、人間が感じる温度感覚に関して定量的なデータが不足していることが展示のヒアリングからわかった。また、格子状にペルチェ素子を配置するのに際し、どの程度の間隔を空けてペルチェ素子を配置すれば隣り合う温度刺激が異なる温度刺激として識別可能であるかについては明らかになっていないことがわかった。そこで、本章では、温度刺激の間隔と温度の識別特性の関係を明らかにし、その結果をもとに温冷感覚呈示の小型ディスプレイを制作した。

### 3.1 温冷呈示の定量化実験

手掌部に対して面的な広がりをもつ温度感覚を呈示するディスプレイ・インタフェースの開発に向けた基礎研究という位置付けで、土井らとヒトの手掌部の温度感覚特性を評価し、その結果を踏まえ、温度刺激の間隔と温度の識別特性の関係を明らかにすることを目的とした温冷呈示の定量化実験をおこなった。[96]

#### 3.1.1 系列カテゴリ法を用いた手掌部における温度感覚特性の評価

本研究では、手掌部に単一の温度刺激を呈示した際の呈示温度と温度感覚の関係を定量的に調べるために、心理学的測定法の一つである系列範疇法（系列カテゴリ法）[97]を用いて実験を行うことにした。系列カテゴリ法を用いることで、刺激をカテゴリに分類して感覚尺度上の値を導きだし、カテゴリの尺度値及び刺激の尺度値の距離尺度を求め、刺激の物理量（温度）と人間の感覚量（温度感覚）の対応関係を調べることができる。本章では、その実験方法について述べる。

##### 3.1.1.1 被験者

被験者として、手掌に外傷や関連既往歴のない成人男性 6 名（平均年齢  $22.5 \pm 1.4$  歳）の協力を得た。なお、本実験は首都大学東京日野キャンパスの研究安全倫理委員会の承認を得て実施している。また、被験者には事前に実験内容を説明し、インフォームドコンセントを得たうえで実験を実施した。

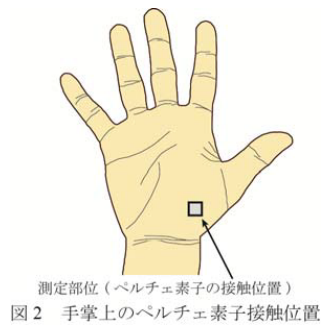


図3.1 手掌上のペルチェ素子接触位置

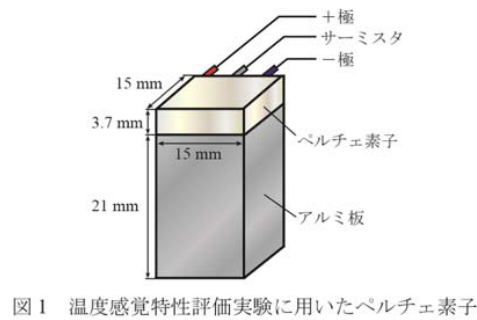


図3.2 温度感覚特性評価実験に用いたペルチェ素子

[95]より許可を取り引用

### 3.1.1.2 手続き

本実験では、図3.2 で示すようなペルチェ素子を用いて被験者に温度刺激を呈示した。温度刺激の生成にペルチェ素子を用いたのは、騒音や振動を発生せず、直流電流の極性を制御することで容易に温度を上昇・下降させることができるためである。また、熱伝性接着剤でアルミ板をペルチェ素子の下に張り付け、ヒートシンクとして用いた。ペルチェ素子のサイズは15 mm×15 mm×3.7 mm であり、0.1℃の温度分解能で-10℃から70℃まで任意の温度に制御することができる。また、ペルチェ素子には熱伝性接着剤を用いてサーミスタが貼付けられおり、サンプリング周波数10 Hz で測定したペルチェ素子の温度を随時PC の表示画面にフィードバックすることで、任意の温度刺激が生成できていることを確認した。

実験はまず、被験者が実験者の「はじめ」の合図でペルチェ素子に測定部位である拇指球（図3.1）が触れるよう、手を押しつけずに自然に置いた。測定部位として拇指球を選定した理由は、手掌をペルチェ素子に置いたときに偏りなく皮膚が素子に接する部位であったためである。さらに、人の皮膚には温覚と冷覚を生起させる受容器がそれぞれ独立して分布しており、その分布密度は手掌の中でも部位によって異なることが知られている [56,57]。これによれば、図2.2 で示す測定部位は温覚と冷覚双方の受容器が分布しており、その分布密度は指先掌側よりも僅かに高いことから、温覚から冷覚までを含む温度感覚の知覚特性を評価する本実験においては測定部位として適当であるといえる。次に、ペルチェ素子の上に手を置いた状態で、電子メトロノームの音に合わせて5 秒間姿勢を保持し、5 秒経過した時点でペルチェ素子から手を放した。なお、測定部位への温度呈示時間を5 秒に統一した理由は、高温物体及び低温物体に意図せず触れた際の知覚反応時間がそれぞれ4 秒 [98] と3 秒 [99] であることを踏まえ、これよりも長く、火傷や凍傷のおそれが少ない5 秒を呈示時間とすることで、温度感覚を十分に知覚できるようにするためである。その後、呈示された温度に対して7 段階のカテゴリ（表3.1）で被験者に回答を求めた。カテゴリは、実現の程度量表現用語の尺度値図[100]の中から、ほぼ等しい間隔であることが明らかにされている「どちらでもない」、「やや」、「だいぶ」に「すごく」を加えた合計7 段階で表現することとした。以上の課程を1 試行とし、図3.1 で示す測定部位に10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 (℃) の9 条件の温度をそれぞれ10 試行ずつランダム順に呈示した。

表3.1 温度感覚のカテゴリ（7 段階）

No.	カテゴリ
1	すごく冷たい
2	だいぶ冷たい
3	やや冷たい
4	どちらでもない
5	やや温かい
6	だいぶ温かい
7	すごく温かい

温度条件の選定については、Mower が行った手掌の温度感覚特性と温度刺激の快・不快感覚特性に関する先行研究 [101] を参考にして、「非常に冷たい」から「非常にあつい」と感じる温度を含むように選定した。また、触れていて非常に不快と感じる温度や低温火傷の可能性がある温度を回避することで、被験者への倫理的配慮を行っている。

本実験は、11 月下旬～12 月上旬にかけて行った。実験環境について、実験室の平均温度は  $22.2 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、平均湿度は  $51.0 \pm 2.8\%$  であった。また、被験者の手掌の皮膚温度を出来る限り統一するため、実験を開始する 20 分前から被験者に手袋を装着してもらい、皮膚温度の低下を防いだ。なお、実験開始前の被験者の手掌温度は平均で  $30.5 \pm 20^{\circ}\text{C}$  であった。実験は適宜休憩を取りながら行い、実験時間はいずれの被験者においても約 2 時間半であった。

### 3.1.1.3 系列カテゴリ法による温度感覚の尺度値導出法

系列カテゴリ法による温度感覚の尺度値の導出法 [97] について、以下に示す。

- (1) 各刺激に対して「すごく冷たい」から「すごく温かい」までの 7 段階のカテゴリ（表1）を用いて評定を行わせる。全被験者の結果を呈示刺激ごとに総計し、各刺激に対応する段階のカテゴリを受ける頻度、及びそのカテゴリまでの累積頻度を算出する。
- (2) 累積頻度より各刺激の累積確率（累積頻度を全試行数で除した値）を算出する。
- (3) 累積確率の各値を標準正規分布に対応する正規偏差  $X_{ij}$  に変換する（Z 値変換）。なお、冷たい呈示刺激から温かい呈示刺激まで 1～9 でナンバリングした（ $i=1\sim9$ ）。また、各カテゴリを 1～7 で示した（ $j=1\sim7$ ）。その際には、累積確率の値が 0.02 以下、0.98 以上の値は除いて変換する。
- (4) 隣り合う二つの正規偏差  $X_{ij}$  が両方とも存在する場合のみ、隣り合う正規偏差  $X_{ij}$  の差  $W_{ij}$  を以下の式(1)により求める。この手続きにより、全ての可能な  $W_{ij}$  の値を算出する。

$$W_{ij} = X_{ij} - X_{i(j-1)} \quad (1)$$

これら二つの正規偏差  $X_{ij}$  は、いずれもが系列の間隔の境目を表し、それらの差である  $W_{ij}$  は間隔の幅を表す。

(5)  $W_{ij}$ の値を系列ごとに合計し、各系列の $W_{ij}$ の相加平均  $\overline{W_{ij}}$  , 及びその累積値も算出する.  
この累積値が全ての刺激に共通な心理学的尺度となる.

(6) 各刺激の尺度値を、累積値を共通な心理学的尺度上に射影することで求める. 以下の式(2)を適用して各刺激の尺度値を算出する.

$$S_i = 1 + \frac{0.5 - \sum P_b}{P_w} \cdot \overline{W_{ij}} \quad (2)$$

$S_i$  : 共通尺度上における第 $i$  番目の刺激の尺度値

1 : 中央値が存在する共通尺度上の間隔の下限

$W$  : 共通尺度上の間隔幅

$\sum P_b$  : 中央値が存在する間隔以下の累積確率

$P_w$  : 中央値が存在する間隔内の比率

この尺度値 $S_i$ より、「すごく冷たい」から「すごく温かい」までの7 段階のカテゴリの範囲において各刺激が存在する位置を、直線補間法と同様な以下の式(3)を用いて求める.

$$A_i = \frac{S_i - 1}{\overline{W_{ij}}} + A_b \quad (3)$$

$A_i$  : カテゴリ尺度内における第 $i$  番目の刺激の尺度値

$A_b$  : 尺度値が存在する間隔の下限の数値

以上の方法により、温度感覚特性評価実験の結果から温度感覚の尺度値を導出する.

#### 3.1.1.4 結果と考察

図3.3 で、呈示された温度刺激に対して感じた温度感覚に相当するカテゴリの割合を反応率として示した. これより、呈示刺激の温度が高くなるにつれて各カテゴリの反応が順番に生じていることがわかる.

また、この反応率の結果を基にして、各カテゴリにおけるそれぞれの呈示刺激の分布を表した結果を図3.4 で示す. 九つの温度の呈示刺激全てが、温度感覚を表す七つの各カテゴリのいずれかに分類されることがわかり、物理量である温度と人の温度感覚との関係が明らかとなった. ここで、各カテゴリと温度を対応させるために、直線補間法によって各カテゴリの中間値を算出した(表3.2)

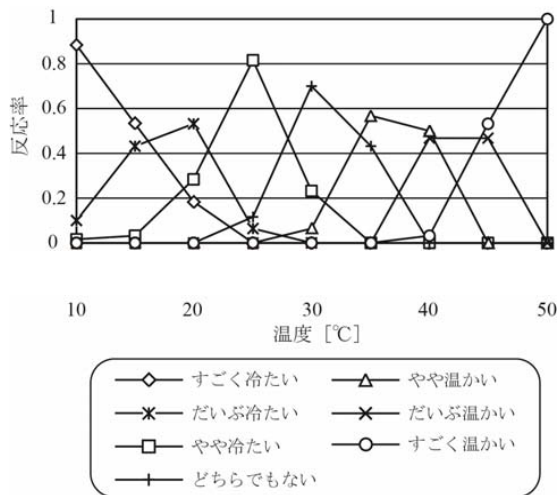


図3 温度と反応率の関係

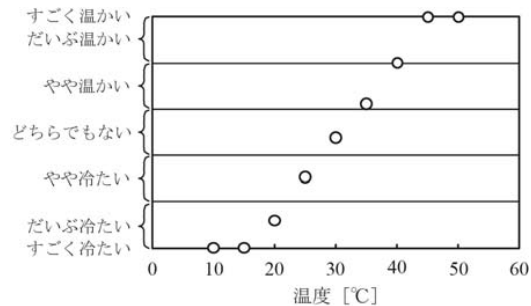


図4 温度とカテゴリの関係

図3.3 温度と反応率の関係

図3.4 温度とカテゴリの関係

[96]より許可を取り引用

表3.2 温度刺激の呈示条件と各カテゴリの中間値の関係

カテゴリ	カテゴリの中間値 [°C]
だいが冷たい	19.4
やや冷たい	25.2
どちらでもない	31.5
やや温かい	37.7
だいが温かい	43.8

これより、直線補間法によって算出される各カテゴリの中間値は、「だいが冷たい」で19.4℃，「やや冷たい」で25.2℃，「どちらでもない」で31.5℃，「やや温かい」で37.7℃の温度は全て個別のカテゴリとして知覚されることがわかったが，40℃～45℃については，「温かい」，「だいが温かい」が同程度の反応率になっており，ここでは個別のカテゴリとして知覚されないことがわかった。

以上より，手掌部に単一の温度刺激を呈示した際の温度と温度感覚の関係を明らかにすることができた．次章では，直線補間法により算出した各カテゴリの中間値の温度を条件として用い，温度刺激間の距離を変えて手掌上の二点に刺激を呈示した際の温度感覚識別特性の評価を行った．

### 3.1.2 人手掌部における温度刺激の間隔と温度の識別特性の関係の評価

本章では，前章で得られた温度感覚特性の結果を基に，二つの異なる温度のペルチェ素子を素子間の間隔（以下，呈示刺激間距離と記す）を変えた条件で手掌部に接触させ，その際の温度感覚識別特性を評価した実験について述べる．

### 3.1.2.1 被験者

被験者として、手掌に外傷や関連既往歴のない成人男性10名（平均年齢 $21.3 \pm 1.6$  歳）の協力を得た。また、倫理的配慮について、本実験は首都大学東京日野キャンパスの研究安全倫理委員会の承認を得て実施している。さらに、被験者に対して事前に実験内容に関する十分な説明を行い、インフォームドコンセントが得られたうえで実験を開始した。

### 3.1.2.2 呈示刺激

本実験では、二つのペルチェ素子それぞれの呈示温度と、手掌上の呈示刺激間距離を実験因子とした。具体的に、呈示温度の条件は、前章で直線補間法を用いて得られた「だいぶ冷たい」，「やや冷たい」，「どちらでもない」，「やや温かい」，「だいぶ温かい」の各カテゴリの中間値である19.4, 25.2, 31.5, 37.7, 43.8 (°C) の五つの温度を組み合わせ、表3.3 で示すように設定した。同じ温度の組み合わせは条件から省いているため、五つのカテゴリのうち異なる二つのカテゴリを組み合わせた合計10 条件を呈示温度の条件とした。呈示刺激間距離の条件は、図3.5 で示すように二つのペルチェ素子間の距離とし、0, 10, 20, 30, 40, 50 (mm) の6 条件を採用した。

ここでは、被験者の手掌の幅を考慮し、それを超えない範囲で条件設定を行った。

表3.3 呈示温度刺激の条件

呈示温度の組み合わせ (10 条件)	だいぶ冷たい	– やや冷たい
		– どちらでもない
		– やや温かい
		– だいぶ温かい
	やや冷たい	– どちらでもない
		– やや温かい
		– だいぶ温かい
	どちらでもない	– やや温かい
		– だいぶ温かい
	やや温かい	– だいぶ温かい
呈示刺激間距離 [mm] (6 条件)	0, 10, 20, 30, 40, 50	

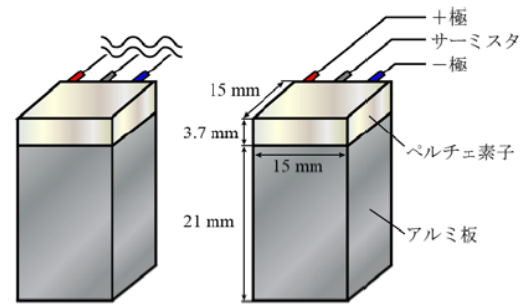
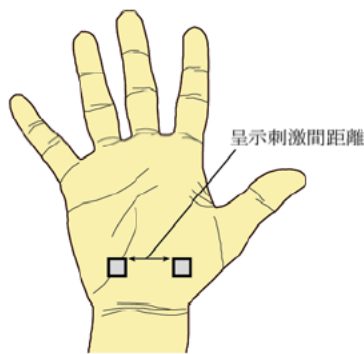


図3.5 手掌上のペルチェ素子接触位置と呈示刺激間距離 図3.6 温度感覚特性評価実験に用いた二つのペルチェ素子[96]より許可を取り引用

以上の二つの実験因子（呈示温度，呈示刺激間距離）を組み合わせると合計60 条件（呈示温度10 条件×呈示刺激間距離6 条件）で実験を行った。

### 3.1.2.3 手続き

本実験では、前章で用いたものと同様のペルチェ素子を二つ用意し、それぞれをチャンネル1，チャンネル2 として個別に温度制御できるようにし、温度刺激として用いた（図3.5）．被験者は、実験者の「はじめ」の合図で、測定部位である手掌部の二点（図3.6）がそれぞれペルチェ素子に触れるように右手を押しつけることなく自然に置いた．その後、電子メトロノームの音に合わせて5 秒間そのままの姿勢保持をし、5秒経過した時点でペルチェ素子から手を放した．その後、呈示された二つの温度刺激に対して紙面でのアンケートの回答を求めた．アンケートは、「チャンネル1 のペルチェ素子の温度がより温かく感じる」、「チャンネル2 のペルチェ素子の温度がより温かく感じる」、「どちらのペルチェ素子の温度も同じに感じる」の三つの選択肢の中から、該当する一つだけを選択するものである．このアンケートを基に、各条件で正しく温度感覚を識別できた割合を百分率で求め、得られた値を識別率として評価に用いた．以上の課程を1 試行とし、各条件で10 試行ずつ行ったため、実験全体での試行数は600 試行（60 条件×各条件で10 試行）であった．なお、本実験に先立って行われた予備実験において、チャンネル1 とチャンネル2 で呈示される温度を入れ替えた場合の識別率にほとんど差がみられなかったことから、ここでは各呈示温度条件において、チャンネル1 とチャンネル2 で呈示される温度を入れ替えてそれぞれ5 試行ずつを行い、全10 試行で得られた値の平均値を識別率とした．また、手掌部の皮膚温度を被験者間で出来る限り統一するため、実験開始20 分前から手袋を着用し、体温が低下しないように配慮した．実験前に測定した手掌の平均温度は $31.0 \pm 2.4^{\circ}\text{C}$ であった．なお、実験は12 月上旬～下旬にかけて行い、実験時間はいずれの被験者においても約1 時間半であった．



### 3.1.2.4 結果

図3.7 (a) ～ (c) で識別率の結果を示す．ここでは、呈示温度のカテゴリの組み合わせごとに結果を示す．具体的に、図3.7 (a) では隣り合うカテゴリ同士の温度を呈示した場合の識別率の結果を示す．同様に、図3.7 (b) では「どちらでもない」と「だいぶ温かい」のように一つ離れたカテゴリ同士の温度を呈示した場合の識別率、図3.7 (c) では「だいぶ温かい」と「だいぶ冷たい」のように二つ以上離れたカテゴリ同士の温度を呈示した場合の識別率を示す．統計処理として呈示温度と呈示刺激間距離を要因とした分散分析を行った．分散分析の結果、呈示温度 ( $p<0.001$ ) と呈示刺激間距離 ( $p<0.001$ ) のそれぞれで主効果が確認された．そのため、Bonferonni 法による下位検定を行い、水準間の有意差を検定した．有意水準は5 %である．

図3.7 (a) で示した隣り合うカテゴリ同士の温度を呈示した場合の識別率について、呈示温度に着目すると、いずれの呈示刺激間距離においても「やや温かいーだいぶ温かい」で識別率は高くなる傾向がみられた．呈示刺激間距離に着目すると、「やや温かいーだいぶ温かい」と「どちらでもないーやや温かい」の呈示温度条件では、呈示刺激間距離を20 mm 離すことで二つの温度感覚の識別率は有意に高くなることがわかった ( $p<0.001$ ) ．「どちらでもないーやや冷たい」では、呈示刺激間距離が30 mm であれば、0 mm に対して有意に識別率は上昇することがわかった ( $p<0.001$ ) ．また、「だいぶ冷たいーやや冷たい」の呈示温度条件では、呈示刺激間距離による識別率の有意差は確認されなかった．

図3.3 (b) で、一つ離れたカテゴリ同士の呈示温度条件における識別率の結果を示す．下位検定の結果、いずれの呈示温度条件においても、呈示刺激間距離を20 mm 以上にすることで、0 mm に対して有意に識別率は高くなることがわかった ( $p<0.01$ ) ．呈示温度条件に関わらず、呈示刺激間距離が20mm 以上であれば高い識別率が得られたが、呈示刺激間距離10 mm から0 mm にかけて識別率は顕著に低下する傾向がみられた．

図3.3 (c) では、二つ以上カテゴリが離れている呈示温度条件での識別率の結果を示す．下位検定の結果、全ての水準間で有意差は認められなかったが、呈示刺激間距離を20 mm 以上にすることで、ほぼ100 %の割合で二点の温度感覚を識別できることがわかった．しかし、0 mm や10 mm といった呈示刺激間距離が短い条件では、識別率は低くなる傾向がみられた．

以上より、呈示する温度のカテゴリを一つ以上離すことで高い識別率を得られることがわかった．一方、隣り合うカテゴリ同士の温度を呈示した場合では識別率は低くなることが確認された．また、ほぼ全ての呈示温度条件において、呈示刺激間距離を20 mm 以上にすれば識別率は向上する傾向がみられた．他方、呈示刺激間距離10 mm から0 mm にかけて識別率は顕著に低下する傾向がみられた．また、隣り合うカテゴリ同士の呈示温度条件では全体的に識別率は低かったが、その中でも「やや温かいーだいぶ温かい」で比較的高い識別率が得られた．

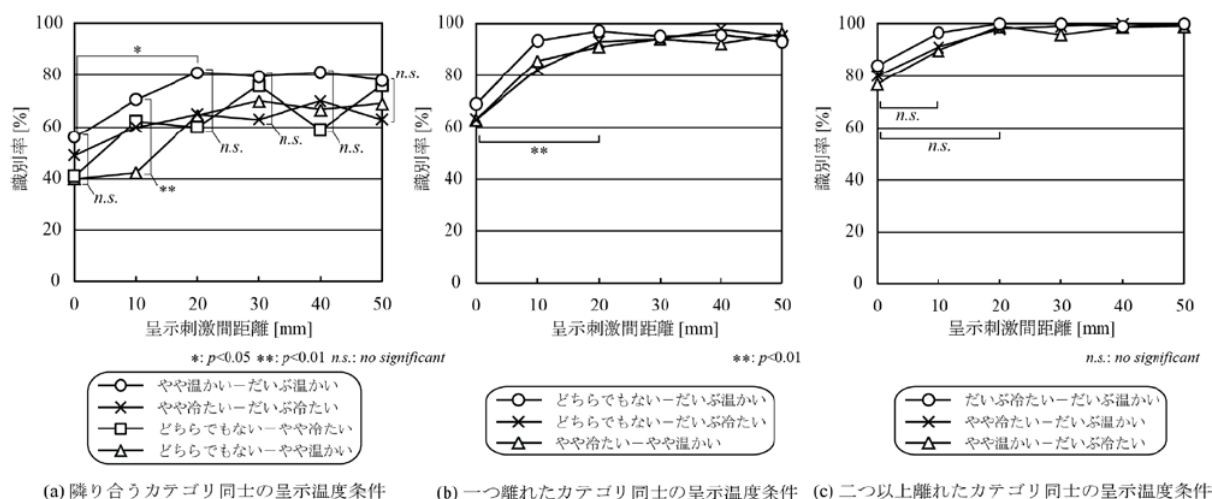


図3.7 二点温度刺激に対する温度感覚識別率の結果 [95]より許可を取り引用

### 3.1.3 考察

呈示刺激間の距離の影響について、ほぼ全ての呈示温度条件において、呈示刺激間距離を20 mm 以上離せば識別率は向上する傾向がみられた。とりわけ、呈示する温度のカテゴリを二つ以上離れた条件においては、呈示刺激間距離を20 mm以上にするだけでほぼ100 %の識別率が得られた。他方、呈示刺激間距離が0 mm や10 mm の条件では、呈示温度に関わらず識別率は低くなる傾向がみられた。温度感の閾値についてVendrikとEijkmanの 2 点弁別閾の実験[102]では、前腕に おける弁別閾が150mm と報告されている。また、NathanとRiceの温 刺激の位置定位実験[103]では、位置知覚精度は手の背 面において 19mm 程度であると報告されている。本制作の実験的検証によればこの知見を考慮しても、得られた結果からは、呈示温度に関わらず、ペルチェ素子の間隔を20 mm以上離して配置することで識別率は向上することがわかった。

なお、ペルチェ素子のサイズによって識別率に及ぼす影響は異なることが考えられる。そのため、サイズと識別率の関係については、改めて検証を行う必要がある。

また、全体的に識別率の低かった隣り合うカテゴリ同士の呈示温度条件において、「やや温かい-だいぶ温かい」で比較的高い識別率を示す傾向がみられた（図3.7 (a)）。このことについて、Beste ら[104]が行った実験を基に考察を行う。Besteらは、手に一定の温度刺激を呈示し、その際の温覚の強度（感覚量）から呈示温度を推測させる実験を行った。これによると、「やや温かい」と感じる領域内の37℃の温度刺激を呈示したときは、ほぼ正確に呈示温度を推定することができるが、呈示温度を37℃よりも高くすると、実際の呈示温度よりも高い温度が呈示されていると感じることが報告されている。これより、「だいぶ温かい」と感じる43.8℃ではさらに高い温度の刺激が呈示されたと感じることも想定され、隣り合うカテゴリ同士の温度刺激であっても識別率が高めになったと考えられる。

全体を見てみると、隣り合うカテゴリ同士の呈示温度では識別率は低くなる傾向がみられ、呈示する温度刺激のカテゴリが一つ以上離れていれば、高い割合で二点の温度刺激を識別できること

がわかった。しかし、隣り合うカテゴリ同士でも刺激間の距離を広げることで識別特性が向上することがわかった。こうした絶対的な温度感覚特性を踏まえて相対的な温度識別特性の関係が定量的に評価できたことは意義深い。以上より、手掌部に二点温度刺激を呈示した際の温度感覚識別特性について、呈示温度と呈示刺激間距離の影響を評価することができた。これらのデータは、温度感覚ディスプレイ・インタフェースを設計するにあたり、デバイスを構成するペルチェ素子の間隔やそれぞれの素子を用いて呈示すべき温度に関する有益な知見を示せるものだと考えられる。

なお、本研究では実験因子として評価してはいないが、呈示刺激として用いるペルチェ素子の面積や、動的な刺激を呈示した際の温度刺激速度も温度感覚識別特性に影響を及ぼすと考えられる。

#### 3.1.4 結論

本研究では、手掌部に対して面的な広がりをもつ温度感覚を呈示するディスプレイ・インタフェースの開発に向けた基礎研究という位置付けで、人間の手掌部の温度感覚特性を評価するとともに、その結果を踏まえ、温度刺激の間隔と温度の識別特性の関係を調べた。具体的には、手掌部上の一点に温度刺激を呈示した際の温度感覚特性の評価を行った。そして、得られた温度感覚特性の結果に基づく二つの異なる温度感覚の刺激を手掌部に呈示し、温度刺激の間隔と温度の識別特性の関係を調べた。その結果、手掌部の温度感覚特性を定量的に評価することができ、さらに、高い割合で温度感覚を識別することのできる温度刺激の間隔が明らかになった。本研究で得られた知見から、温度感覚ディスプレイ・インタフェースを設計するにあたり、格子状に配置するペルチェ素子間の間隔やそれぞれのペルチェ素子を用いて呈示すべき温度に関して参考となるデータを示すことができた。

次章では、ここで明らかになった温度刺激の間隔を基にディスプレイを制作し、そのディスプレイを使用した表現がどのように変わるか、表現の可能性はどうかを述べる。

## 3.2 温冷呈示による小型視触覚ディスプレイの制作

前章では呈示温度に関わらず、ペルチェ素子の間隔を20 mm以上離して配置することで識別率は向上することがわかった。その結果を元に、温冷呈示ディスプレイの解像度の課題を解決するために、温冷呈示9インチ80ピクセルの小型ディスプレイを開発した。ディスプレイの解像度が上がれば、これまでできなかった温度による文字などの表示や表現できる映像やそれに伴った体験が変わると考えた。そこで、小型ディスプレイを使用した映像コンテンツとして触覚の錯覚であるサーマルグリルイリュージョンをインタラクティブに呈示できるシステムとインタラクティブに温度による描画ができるシステムの開発をおこなった。本章では、小型ディスプレイのシステムとそのコンテンツの開発について述べ、展示時の体験者のヒアリングと観察結果から本システムがどのような効果をもたらしたかを論じる。

### 3.2.1 システム構成

システムは、冷温ディスプレイ部とディスプレイを動かす電源部、画像と制御をつかさどるPC部と上部からディスプレイに投影する小型プロジェクターの構成からなる。本研究は前章の実験で使用した15mm角のペルチェ素子を80 個使用することで、画素数と小型化を図り、表示ディスプレイとしての実装化をした。システム構成図を図3.8 に記す。

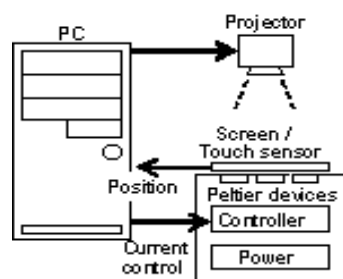


図3.8 システム構成図

### ディスプレイの設計

使用した主な材料の一覧を表に記す。ペルチェ素子は冷却、加熱面の切り替えが電流の切り替えによって可能な素子である。指先の接地面を考慮し一辺15mmのペルチェ素子8×10 列の80 個を並べた図3.9 のような5cm の深さのあるオリジナルな9 インチディスプレイを制作した。冷温呈示に一遍が15mm 角のペルチェ素子（FUJITAKA FPH1-3104-S4）8×10 列合計80 個を使用した。ペルチェ素子を使用することで、冷却、加熱面の切り替えが可能である。

それぞれのペルチェ素子下部に冷温の熱を放熱するための放熱器（W15-25W）とDC ファン（HF-1508-5）を接続し、1 個1 個のペルチェ素子が急速に熱の放熱ができ、冷温個別に制御できるようプログラムされている。1 個1 個が冷温個別に制御できるようプログラムしたことで、冷温の描画が同一画面で可能になった。（図3.9,図3.10）

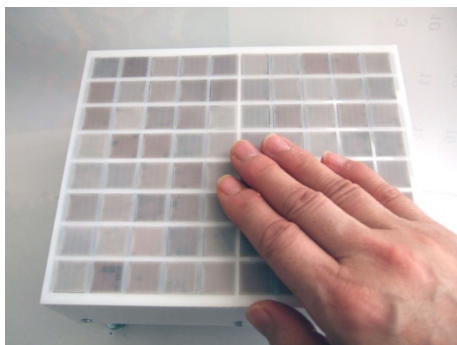


図3.9 80ピクセル 9 インチディスプレイ  
使用した主な材料を表3.4に記す。

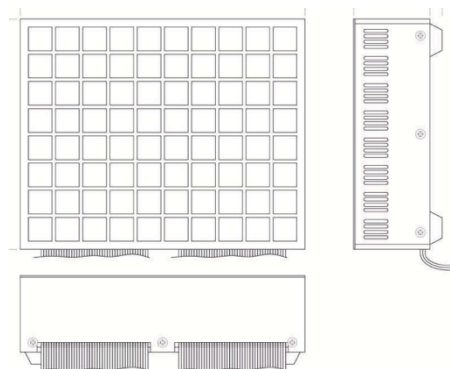


図3.10 ディスプレイ図面

表3.4 温冷ディスプレイ部品

ペルチェ素子	FPH1-3104-S4
ペルチェ寸法	寸法 15x15x3.8(WxDxH)mm
ペルチェ規格	最大電流 3.0A, 最大電圧 3.8V
DCファン	W15-25W

ディスプレイの断面図を図3.11, 実装した裏面と側面写真を図3.12,3.13 に記す. 各ペルチェ素子の間は, 配線の都合1mmとし, ディスプレイ画面に対する画素数をあげた結果, 9 インチ相当のディスプレイ80 ピクセルの小型冷温ディスプレイを実装した. 熱が排気されるよう側面と裏面に排気口をもうけ, 有効な熱伝達スピードを可能にさせた. ディスプレイの正面, 裏面および側面は, 埃と安全確保のためアクリル板の外装を制作した.

温度呈示は, 室温20℃時, 冷10℃—温40℃, 冷温 100%,75%,50%,25%,0%の5 段階の温度調整が可能なようPWM 制御されている.

ノートPCでの制御も可能なようにUSBを使用したデジタルI/O とした. 全体にかかる消費電力使用コスト, 省スペース化, 重量が減りより利便性の向上が得られた.

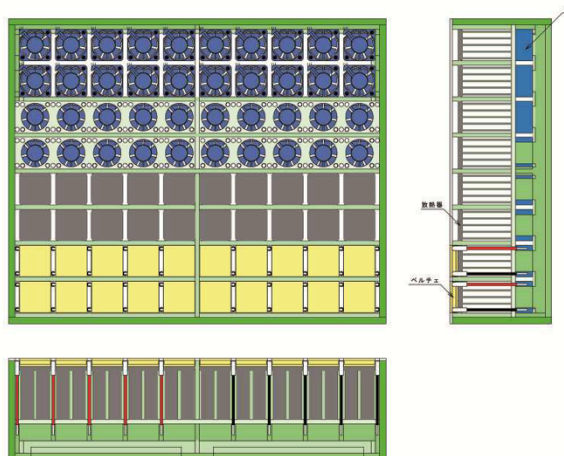


図 3.11 ディスプレイ断面図

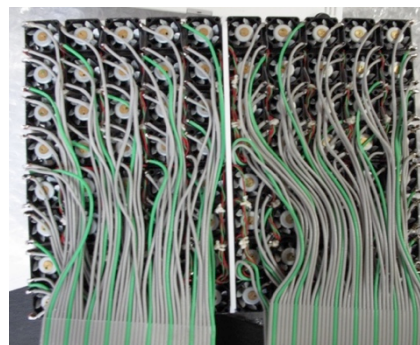


図 3.12 ディスプレイ背面

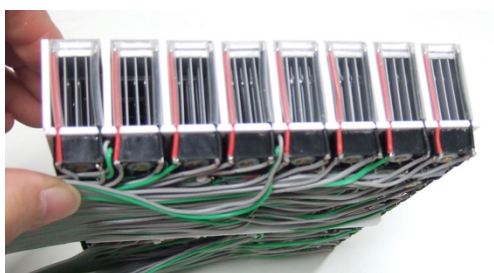


図 3.13 ディスプレイ側面

### 3.2.2 画像コンテンツ

#### 3.2.2.1 サーマलगリルイリュージョンの表示コンテンツ

サーマルグリルイリュージョンと呼ばれる温度錯覚がある。1896年Thunberg[105]が最初に示された冷温の錯覚である[Thunberg'illusion]として暖かいバーと冷たいバーとが交互に並んでいるグリルに触れたときに感じる熱痛覚のような錯覚（幻覚）を感じとして示された。暖かいバーと冷たいバーとが交互に並んでいるグリルに触れた時に熱痛覚のような感覚を感じる錯覚であり、皮膚を損傷することなく痛みを生成するための実験として利用されている[106,107]。これまでは、定位置に設定した温冷を並べたバーを触る装置であったが、本研究によるディスプレイを使用することにより、温冷のバーを移動させるサーマルグリルイリュージョンの現象を再現できると考えた。

画像は、冷温を青、暖かい温度を赤で表示し、赤、白、青の縞を、縦縞、横縞、斜め2種の4パターンを用意し縞のスピードを変更可能な移動するアニメーションを制作した。投影した部分のペルチェ素子がそれぞれ、映像の色と冷温、暖かい温度が対応するようプログラミングした。赤と青に挟まれた白は冷温から温へ変化するインターバルとして機能する。3章1の温冷呈示の判別距離の実験より、2温度間の距離2cm離すという結果から温度を呈示しない白部分の必要があった。異なる線的なパターンの温度感覚刺激を手掌部に呈示でき、細かい温度表示が制御できることによって触覚の錯覚である錯触についての呈示をおこなった。また、線的な温冷バーの変化のスピードと本ディスプレイの温度呈示の性能の関係があり、適正なスピードで変化するように調整した。



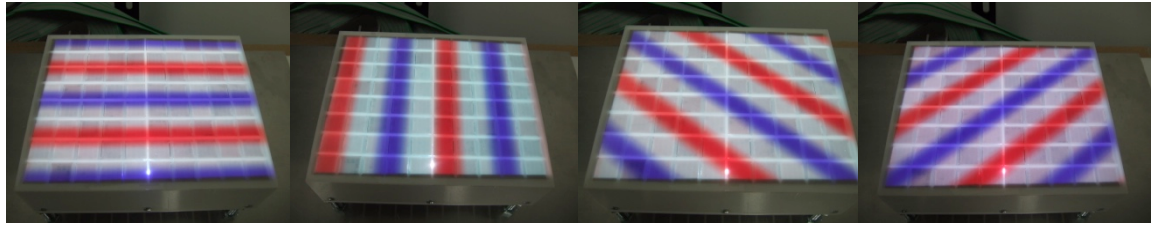


図 3.14 サーマलगリルイリュージョンの温度呈示と画像投影パターン

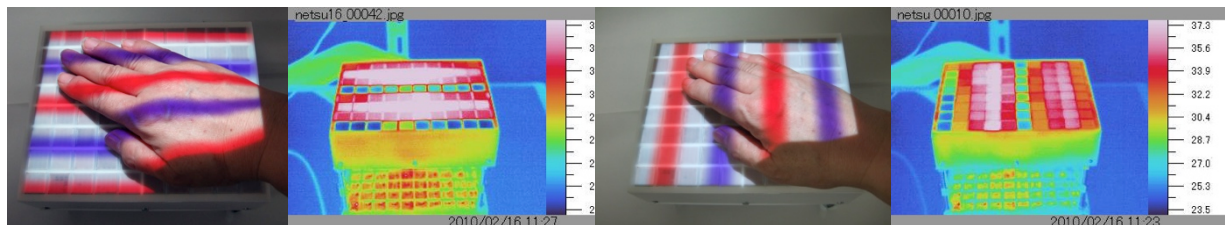


図 3.15 画像投影とサーモグラフィカメラによる温度表示

2010年3月の情報処理学会インタラクション2010および10月の日本科学未来館での DCEXPO2010 ASIAGRAPH2010にて展示と発表を行った。そこでの体験者の意見として、「じっと手を置いているだけで温度の波がわかる」「痛い」「不思議な感覚を体験した」「熱いのか冷たいのわからなくなってくる」「何に応用できるのか」「文字や数字は伝えることができるのか」というコメントがあった。[108,109]



図3.16 DCEXPO2010での展示

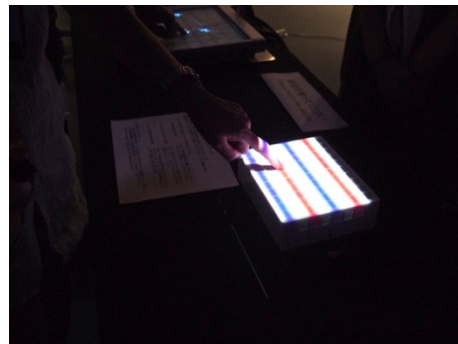


図3.17 DCEXPO2010での展示

### 3.2.2.2 温冷呈示ができるお絵描きシステム

2章2や3章2の画像の呈示方法は、あらかじめ画像をコンピュータにプログラムしたものしか呈示ができなかった。自分で描いた画やアニメーションが簡単に温冷呈示でき、どのソフトからも対応できる温冷呈示方法"Thermo Drawing"[110]を開発し実装した。(図3.18)これによってインタラクティブに自分か描いた絵がそのまま温冷呈示できるだけでなく、これまであったアニメーションや写真なども温冷呈示が可能になり、画像に合わせた温冷のインタラクションがある温冷表示できる画像表示装置として楽しみが広がる。

15mm 各ペルチェ素子80 個からなる冷温表示がインタラクティブに可能なディスプレイに絵を描きながら温度の体験ができるようディスプレイ面と描画面を離し、ペンタブレット

(Wacom Bamboo Fun) を使用して描画できるようにした。冷温ディスプレイ上にはプロジェクターから画像が投影され、画像と冷温の位置がインタラクティブに同期するようプログラミングされている。



図3.18 Thermo-Drawing 2011 9 インチディスプレイ

画像生成部は、ペンタブレットからの画像の位置と色情報を0.5 秒ごとにBitBlt 関数を使いコンピュータ上の画面をキャプチャし、色情報を温度情報に変換してディスプレイ部分の温度を制御している。Bitblt 関数とは、画面表示に用いられるビットマップイメージを、メインメモリからグラフィックスメモリへと転送する関数のことである。キャプチャした画像をRGBに分解し、画素の色情報から冷温の信号に直してイベントに送っている。Red の値が大きければ温かく、Blue の値が大きければ冷たくなる。コンピュータ画面をプロジェクターによって上部からテーブル面に向けて投影する。画像生成にはC 言語を使用し、冷温感覚に連動したリアルタイムの映像を提供している。

### 描画ドローイング

コンピュータ上の画面をキャプチャするため、描画するためのソフトは、既成の描画ソフトが使用できる。図3.19は、Windows 付属のペイントを使用した例である。描いた絵の色に合わせ、冷温表示がされている。

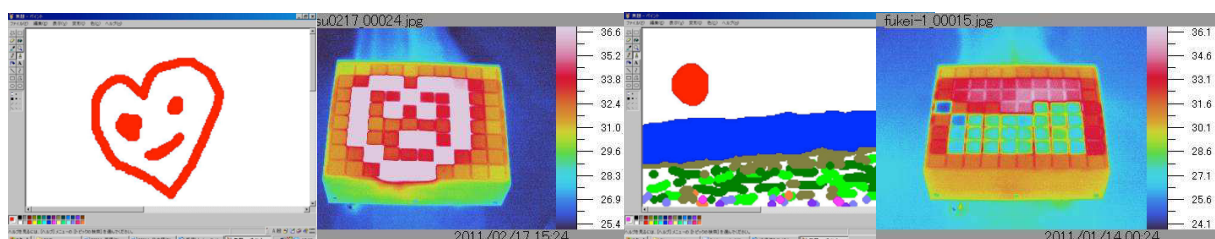


図3.19 Thermo-Drawing ペイント 描画ソフトを用いた例

### アニメーション

コンピュータ画面に映し出されたものの色をキャプチャするので、アニメーション動画にも温度情報を付加することができる。図3.20,図3.21は、赤・青のアニメーション動画の実験例である。



温度の移動がアニメーションと同期し、新しい温度によるアニメーション表現を提案している。すでにある写真や撮影した動画、サーモカメラで取得した熱画像などを温冷呈示することも可能である。

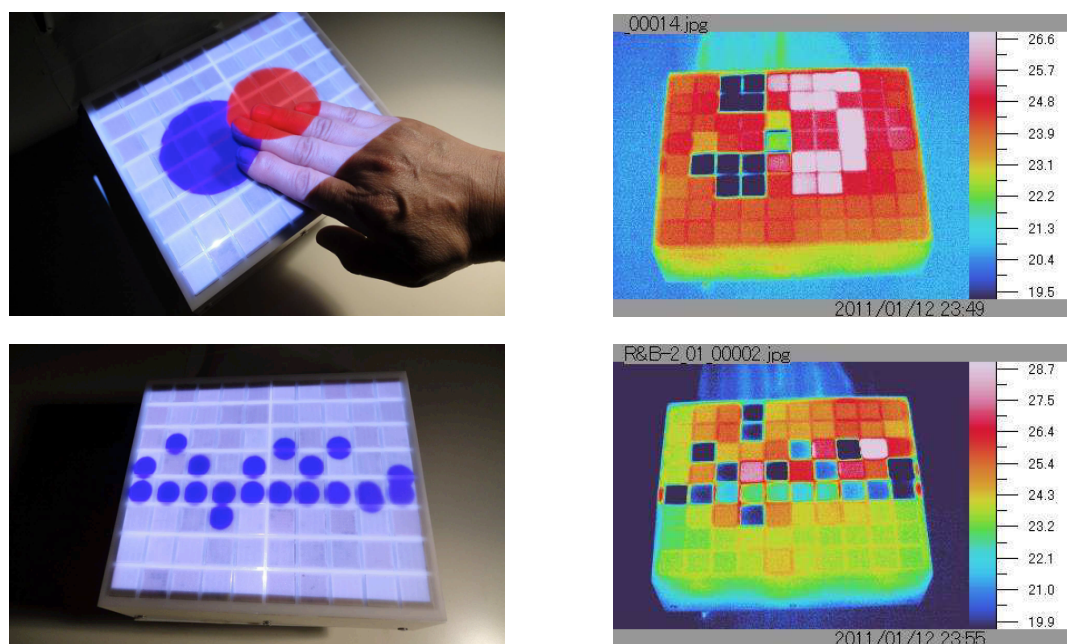


図3.20 赤青—冷温アニメーションの表示例

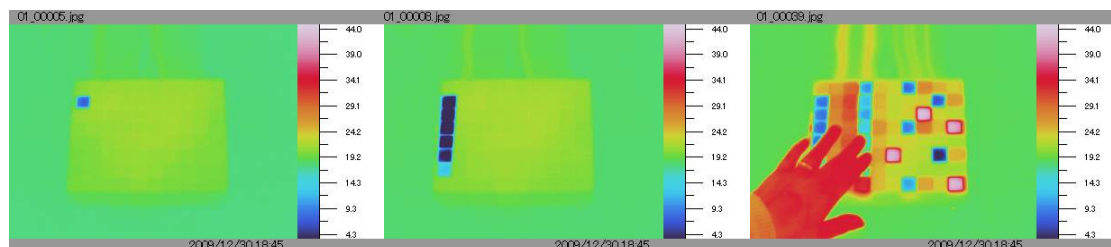


図3.21 Thermo-Drawing サーモグラフィカメラによるアニメーション画像

## 展示

本システムはASIAGRAPH 2011(図3.22)において実演展示を行い、国内外の2000人以上の体験者を得た。体験した観客の意見として、温度による絵画や手の中で感じる温度アニメーションなど初めての体験に驚く意見が多かった。ペンタブレットの使用と冷温ディスプレイの一体化を図れないか、温度のピクセル数が細かくなれないか、黄色、緑など中間色の色の温度呈示についての質問があった。

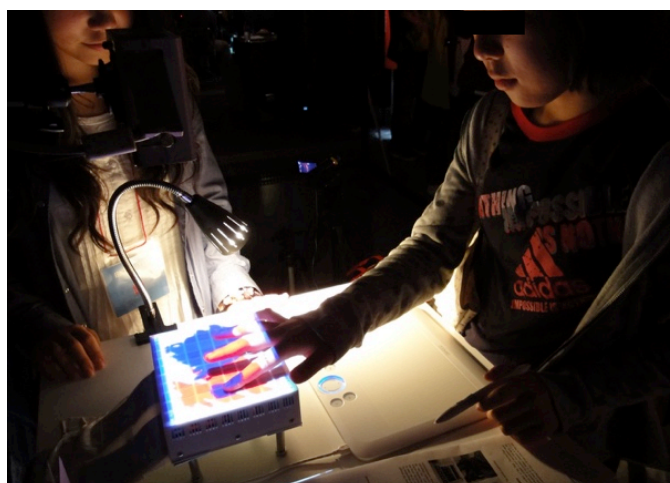


図3.22 AGIAGRAPH 2011の展示発表

### 3.2.3 考察

ディスプレイの解像度が上がれば、これまでできなかった温度による文字などの表示や表現で  
きる映像やそれに伴った体験が変わると考え、映像コンテンツとして触覚の錯覚であるサーマル  
グリルイリュージョンをインタラクティブに呈示できるシステムとインタラクティブに温度に  
よる描画ができるシステムの開発をおこなった。

サーマルグリルイリュージョンの映像コンテンツと温度の連動によるシステムでは、そこでの体  
験者の意見として、「じっと手を置いているだけで温度の波がわかる」「痛い」「不思議な感覚  
を体験した」「熱いのか冷たいのかがわからなくなってくる」「何に应用できるのか」「文字や  
数字は伝えることができるのか」「もっと省エネルギーで簡易的な温冷呈示はできないか」とい  
うコメントがあった。

「温度の波がわかる」というコメントは、50インチのディスプレイでは得られなかった手掌に収  
まる小型ディスプレイでありかつ80ピクセルの画素ならではの体験からくる意見である。

「痛い」「不思議な感覚を体験した」「熱いのか冷たいのかがわからなくなってくる」は、サー  
マルグリルイリュージョンならではの暖かいバーと冷たいバーとが交互に並んでいるグリルに  
触れたときに感じる熱痛覚のような錯覚（幻覚）を感じる温度による触覚の錯覚が発生している  
とも考えられる。正確に温冷呈示がバー状に呈示ができていることがわかる。温と冷温の間にイ  
ンターバルをおき、温冷のバーの速度を調整できることによって、最適な温度変化を呈示でき  
る工夫をしたことが呈示の成功の要因だと考えられる。

「何に应用できるのか」については、実社会では、人体に安全な温度にもかかわらず痛みを感じ  
ることを利用して危険を知らせる触れるサインなどの使用や、視覚に障がいがある人に対して温  
度情報を伴った点字などの情報補助に使用できると考える。また、ディスプレイの形状ではなく、  
生活の中に溶け込んだ例えば、家具や家電、日常用品の中に温冷呈示を組み込むという方向も考  
えられる。

「文字や数字を表示し伝えることができるか」について図3.23のような表示をおこなった．80ピクセルの簡単な文字であればサーモグラフィーカメラを使用してディスプレイの温度画像を取得した結果からも文字の呈示は可能であることがわかった．しかし，実際の体験からは実用として温冷のみの触覚だけで何の文字が表示されているかの即座の判定は難しいと感じた．ただし，他の文字や形の違いは判定できるので，点字のような限られたピクセル数で表示可能な文字やパターンで情報を伝えることは可能だと思われた．

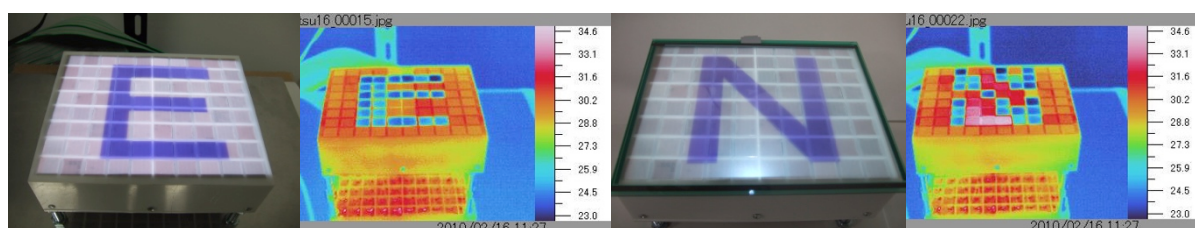


図3.23 文字呈示とサーモグラフィーカメラによる温度表示

そこで，温冷パターンに注目した研究として，筆者らはペルチェ素子と液晶サーモグラフシートを使用したデザイン表示である図3.24のようなThermo-Pict [111] や Thermo-Pict neo[112]をおこなった．

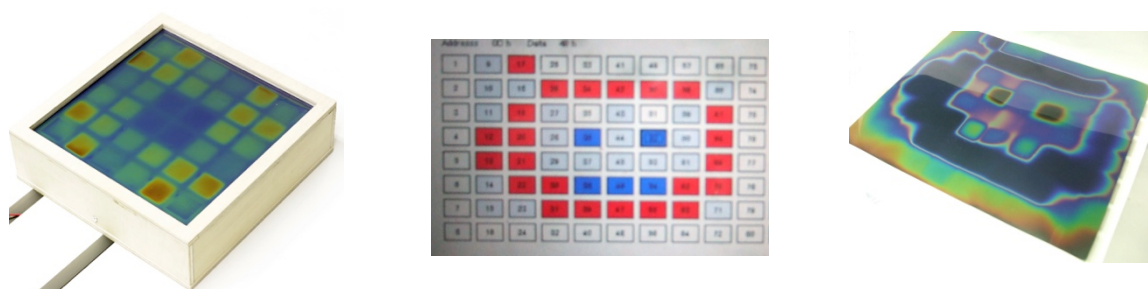


図3.24 液晶サーモグラフィーシートによる温度表示

これまで画像呈示にプロジェクターを使用していたシステムから，液晶サーモグラフィーシートの使用によってディスプレイ単独での温冷表示の視覚化が可能になった．

展示の結果，温度にあったサーモグラフィーシートへのパターン表示が可能であり，液晶サーモグラフィーシートならではのグラデーションをともなった色の変化を呈示することができ，遊びのあるデザイン表示や遠隔地の気温などを数値ではなくグラフィック情報として示せるなど表現の可能性が考えられる．「もっと省エネルギーで簡易的な温冷呈示はできないか」のコメントに対して，ビデオプロジェクターなどの映像装置がなくとも簡易に温冷呈示を視覚化する方法により実社会での応用にも広がりを持てると考える．

触覚画面をキャプチャすることでインタラクティブに冷温描画ができるシステムについて体験した観客の意見として，「ペンタブレットの使用と冷温ディスプレイの一体化を図れないか」，

「温度のピクセル数が細かくなかないか」，「これまでになり温度のお絵描きが可能であり驚いた」「黄色，緑など中間色の色の温度呈示について」の質問があった．

「ペンタブレットの使用と冷温ディスプレイの一体化を図れないか」については，ディスプレイ状に直接描けるようタッチパネルの装着を考えている．「温度のピクセル数が細かくなかないか」については，ペルチェ素子サイズとペルチェ素子の熱の放出方法を検討すれば可能だと考える．熱の放出のための電力が多くかかり，省エネルギーでシステムを構築させることは課題であると考え．「これまでになり温度のお絵描きが可能であり驚いた」については温度による絵本や教材など表現の可能性があることを示していると考え．「黄色，緑など中間色の色の温度呈示について」は，本来5段階温度呈示ができるところを展示では3段階のみの呈示にしていたので，温度の領域は少なかったのではないかと考えられる．また，5段階の温度呈示にした場合，温度の違いが手で触った時にわかるのか，隣り合う温度に干渉されないか，温度刺激に対する慣れについては課題があると考え．

### 3.2.4 結論

温冷呈示ディスプレイの解像度の課題を解決するために，指先の大きさに合わせた15mm角のペルチェ素子を格子状に配置し，それぞれ温冷呈示を個々に制御可能な急速冷却装置とその駆動部分と連動させた画像プログラムによりインタラクティブに温度呈示と画像呈示が連動する手の平大の小型ディスプレイを開発できた．隣り合う温度との識別のためにペルチェ素子同士の間隔が25mm空いていると支障なく温度の違いを弁別できる実験結果を生かし，ペルチェ素子のサイズや間隔を決定することができた．また，その弁別距離を生かし，触覚の錯覚であるサーマルグリルイリュージョンを再現できる温度コンテンツを制作することができた．ディスプレイの解像度が上がることによって，これまでできなかった温度による文字などの表示や温度アニメーションを手の平内で体験することができた．温度による描画ができるシステムを開発できたことによって描いた絵画や既存の絵画に色に対応した温度をつけることが可能になり，温度の付加された絵画やアニメーションなどのメディア表現を提案することができ

## 第 4 章

### 温冷感覚呈示ディスプレイの応用と考察

#### はじめに

2章2では50インチ温冷呈示による視触覚ディスプレイを制作した。その制作を通じ晴眼者にとって温冷呈示ディスプレイによってイメージを増幅させるコンテンツの表現が可能であることが示された。3章1では、手掌部に対して面的な広がりをもつ温度感覚を呈示するディスプレイ・インタフェースの開発に向けた基礎研究という位置付けで、晴眼者の人の手掌部の温度感覚特性を評価するとともに、その結果を踏まえ、温度刺激の間隔と温度の識別特性の関係を明らかにした。3章2では前章の結果を元に、温冷呈示ディスプレイの解像度の課題を解決するために、温冷呈示9インチ80ピクセルの小型ディスプレイを開発し、ディスプレイの解像度にあったコンテンツの制作をし、晴眼の体験者に新しい触覚表現を提供できることが確認された。本章ではそのディスプレイを使用し、視覚障がい者と視覚障がい教育に関わる教員へのヒアリング、温冷呈示の応用、2,3,4章のまとめとして温冷呈示ディスプレイのメディア表現の拡張について総合的な考察を述べる。

#### 4.1 視覚障がい関係者による温冷呈示ディスプレイヒアリング調査

2,3 章で温冷呈示ディスプレイを開発し、ディスプレイの解像度にあったコンテンツの制作をし、晴眼の体験者に新しい触覚表現を提供できることが確認された。これまでの体験者は晴眼者であったが、視覚障がい者にとって温冷呈示ディスプレイがどのような効果があるのか、晴眼者との違いがあるのかについてヒアリングする必要があると感じた。そこで、2件のヒアリング調査を行った。1件目は企業で玩具の評価を行い、かつ全盲の障がいのある体験者による個人のヒアリングであり、2件目は障がい児教育に関わる教員の体験（モニター調査）であり、本章ではそのヒアリング結果を報告する。

##### 4.1.1 視覚障がい者へのヒアリング調査

障がい者でも楽しめ かつ 健常者との区別なくコミュニケーションの図れる手段の考察のための 触覚ディスプレイの体験の印象、コメント、改善点について意見をヒアリングした。結果は、今後の障がい者と触覚研究を結ぶ指針としたい。

#### 方法

2012 年 10 月企業で玩具の評価を行い、かつ全盲の障がいのある体験者による個人のヒアリングをおこなった。本研究のテーマである、冷温感覚 19 インチディスプレイ 1 件の他に 触覚のディスプレイの比較として電磁石を使用したインタラクティブな触覚ディスプレイと毛の上下、



回転運動をサーボモーターで制御したディスプレイ，タッチパネル壁面 人体接触による触覚遊具の合計 6 件の体験をしてもらう．ヒアリング内容は，音声による録音とビデオによる撮影をし，文字に起こした文章から，今後の参考になる内容をピックアップする．

### 実験条件

室温 20 度，自由発言，コメント

実験時間 約 2 時間 初めて体験するディスプレイ

### 体験触覚ディスプレイ

1. ふわふわ凹凸ディスプレイ（サーボモーターと天然毛）
2. 冷温ディスプレイ（ペルチェ素子）
3. 電磁石によるアクティブボール（電磁石と振動素子）
4. 砂状硬軟ディスプレイ（電磁石と極小スチールボール）
5. 大型タッチパネルの映像と音ディスプレイ（タッチパネルとプラズマディスプレイ）
6. 人体接触による音のインタラクション玩具(人体接触)



図 4-51 ヒアリング風景

### ヒアリング結果

ヒアリング結果として，下記の結果をえることができた．

- ・ 健常者の触覚が視覚に強く影響を受けるように，視力障がい者の場合，触覚表現に連動した聴覚のインタラクションを考える必要がある（1名）
- ・ 全体を見渡せない視覚障がい者にとって，ディスプレイの大きさを把握するための基準となるべくマーカーや枠の配慮が必要である（1名）
- ・ ピンディスプレイの急激なインタラクションに比べ，冷温ディスプレイは温度変化のインタラクションが穏やかであり，その特性に合わせた利用方法が望まれる（1名）
- ・ 安心感を与える触覚表現として，安定した素材の選定，安定した機器の運営，音への配慮が必要である（1名）

- ・楽しみとしての触覚表現として、想像力をかきたてるようなコンテンツや、素材を生かす工夫、その触覚やインタラクションならではの表現に検討が必要である（1名）
- ・健常者と障がい者が共存して体験できる場の検討が必要である（1名）

#### 4.1.2 障がい児教育に関わる教員へのヒアリング調査

##### 4.1.2.1 緒言

本章では、表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した冷温覚触表示や硬軟触表示を視覚と同一箇所に表現を感受することができるディスプレイ装置に着目し、視覚効果だけでなく触ることにより体験できる新しいディスプレイの開発を推進している。障がい者・高齢者配慮設計が進みつつある現状では、これらのディスプレイの共用化の可能性について整理する必要がある。そこで本章では、国立特別支援教育総合研究所土井研究員の協力により障がい児教育に関わる教員に体験（モニター調査）してもらうことで、今回開発したディスプレイ（冷温覚触表示型に特化）の共用化<sup>1)</sup>の可能性及び課題について整理する。

##### 4.1.2.2 共用化に関するモニター調査

本ディスプレイが障がいの有無に関わらず共用できるかどうかについて、障がい者・高齢者配慮設計が求められる時代からしても整理する必要がある。ここでは、触覚による感覚代行が求められる視覚障がい者を利用者として想定し、2012年11月、国立特別支援教育総合研究所の土井の協力のもと視覚障がい教育に関わる教員10名（特別支援学校教員経験数3～20年）に本章で開発したディスプレイを自由に触ってもらい、そのディスプレイに触図シートを付す効果があるかどうかについて自由回答で意見を求めた。なお、ディスプレイの任意の位置に触れると温かくなったり冷たくなったりする2つのモード（冷刺激・温刺激）で調査を実施した。以下にモニターの主な意見を列挙する。



図 4-52 モニター評価で温冷感覚呈示ディスプレイを触ってもらっている様子

- ・温冷感覚刺激の活用は児童生徒の関心をひくのではないかと（全員）
  - ・教員と児童，児童間，晴眼児童ともで楽しむことができる（8名）
  - ・触図のような凸刺激と併用することは凸刺激の触知を支援する効果が期待できそう（9名）
- ー改善点提案意見ー

- ・ 温冷刺激呈示面の色を黒あるいは青にして視覚情報のコントラストを高くして弱視児童に対する配慮をしてはどうか（7名）
- ・ 音の刺激呈示の際には高性能なスピーカーを用いることで刺激の効果を上げてはどうか（5名）
- ・ 温冷の刺激のモード切換えで、音声ガイドが必要
- ・ ディスプレイの活用法に関する音声案内が用意されていると良い

以上のことから、格子状にペルチェ素子を配置したディスプレイを触図に適用することについては効果が期待できるとの意見が大半であった。一方で、冷刺激呈示面の色を黒あるいは青にして視覚情報のコントラストを高くして弱視児童に対する配慮をしてはどうかとの提案もあった。今後の調査では、実際に触図を敷いたディスプレイを用いて同様な評価を行う予定である。

#### 4.1.3 考察

以上のような意見を踏まえ、本ディスプレイの共用化の可能性と課題について考察することにする。本ディスプレイに関しては、視覚障がいのある児童には、これまでにないディスプレイで体感的で触って楽しむことができると考える。また、複数の児童で、視覚障がいの有無に関係なく共用もできるという特長は評価できるであろう。一方で、改善点も明らかになった。弱視児童に対してはディスプレイのコントラストの改善が必要である。具体的には、格子状に配置された白いペルチェ素子の上に熱伝導率が高く、黒あるいは濃い青の薄いフィルムを貼ることで視覚情報のコントラストの改善や、投影するディスプレイの背景を同様な色にする等の配慮が効果的であると考えられる。全盲児童に対する配慮としては、触っている間のフィードバックをより体感的にする要望も明らかになった。ペルチェ素子の盤面の下に力センサを搭載することで、触れる力を検出し、力の値に対応した音量を呈示することも面白いのではないだろうか。音声案内が必要であることも指摘された。障がいの有無に関係なく、わかりやすいディスプレイの案内方法も重要であることが明らかになった。

#### 4.1.4 まとめ

本研究の一環として実施した本ディスプレイのモニター評価の結果、触覚情報も呈示可能なディスプレイは共用化の可能性があることがわかった。一方で、共用化に向けた課題も明らかになった。今後は、著者らが行っている人間の指先の温冷感覚特性と加齢効果についての研究に加え、児童における同様な特性も調べながら、人間の指先の温冷感覚特性をより厳密に踏まえたディスプレイを設計していくことも検討していく予定である。

#### 4.1.5 結論

障がい者の体験を交えた評価を行ったことから、健常者の触覚体験が視覚に補われている傾向があるという、健常者と障がい者の感覚の違いを見ることができた。視覚障がいのある児童には、これまでにないディスプレイで体感的で触って楽しむことができ、視覚障がいの有無に関係なく共用もできるという特長は評価できることから触覚情報も呈示可能なディスプレイは共用化の可能性があることがわかった。



今後の課題として、弱視児童に対してはディスプレイのコントラストの改善が必要である。具体的には、格子状に配置された白いペルチェ素子の上に熱伝導率が高く、黒あるいは濃い青の薄いフィルムを貼ることで視覚情報のコントラストの改善や、投影するディスプレイの背景を同様な色にする等の配慮が効果的であると考えられる。全盲児童に対する配慮としては、触っている間のフィードバックをより体感的にする要望も明らかになった。ペルチェ素子の盤面の下に力センサを搭載することで、触れる力を検出し、力の値に対応した音量を呈示することも考えられた。音声案内が必要であることも指摘された。障がいの有無に関係なく、わかりやすいディスプレイの案内方法も重要であることが明らかになった。

## 4.2 温冷感覚呈示ディスプレイの応用

ここでは、温度呈示方法をディスプレイ以外の情報伝達に利用した開発を述べる。これまで、9 インチ、15 インチ、50 インチ、70 インチの温冷呈示のディスプレイの開発を行った。ディスプレイとして情報を伝えるための解像度、すなわち画素数を増やすこと方向があった。材料コストやエネルギーの経済性や普及を考えると、最小限の温冷素子数で情報を伝える方法が模索される。また、日常空間の中での応用を考えると、呈示方法もディスプレイ以外の使用方法が考えられる。ここでは、2 つの試作を取り上げる。1 つ目は、ゲームに温冷呈示を使用したゲームコントローラの開発を首都大学東京の馬場とおこなった[113]。2 つ目は温冷呈示できる椅子の試作である。本章では、その開発結果と実際の展示から観察された温冷感覚呈示の応用について考察を加える。

### 4.2.1 ビデオゲームインタラクションの試作

#### 4.2.1.1 はじめに

ビデオゲームコントローラはこれまで製品・研究レベルから数多くの事例が報告されている。十字ボタンと AB ボタンからなるオーソドックスなものから、グローブ型のもの、身体動作でゲーム操作するもの等、その種類は数多い。このようにゲーム入力操作においては多種のインタラクションが実現されている一方で、ゲーム側からユーザに視聴覚以外の情報を呈示する手法に関して、振動モータを利用した触覚呈示以外に、あまり事例がみられない。本研究ではこれらゲームコントローラの中で特にユーザに対して皮膚感覚呈示が可能なものに焦点を当てる。多種のゲームコントローラが存在する中で、皮膚感覚呈示可能なコントローラは限られており、中でも振動モータを利用した触覚呈示を行うものが一般的である。皮膚感覚には触覚の他、痛覚や温度感覚があり、痛覚に関しては Volker らによるアートワーク「PainStation」があげられる。しかしゲームデバイスの中に温冷感覚を応用した事例は少ない。

筆者はこれまで温度感覚呈示を利用したメディアアートのアプローチを行ってきており、これらから得られた知見を背景に、温度感覚呈示をビデオゲームシステムに応用した事例を本稿で報告する。

#### 4.2.1.2 実装

##### 4.2.1.2.1 温冷感呈示位置

冷・温点は体の各部位に存在する．本ゲームを利用する際どの部位に冷温感を呈示するかに関して検討をおこない，まずは一般的なゲームコントローラからの呈示とし，温冷感呈示位置をユーザの手掌に限定した．手掌部の冷・温点を位置 [56]を踏まえ，ゲームコントローラを握る際，ユーザの手掌が自然とコントローラに触れることを考慮した結果，ペルチェ素子をコントローラ側面に配した．

##### 4.2.1.2.2 ハードウェア

制作したコントローラ外観を図 4-53 に示す．ユーザに冷温感を呈示する仕組みにはペルチェ素子を用いる．15mm 角のペルチェ素子をコントローラ側面に配し，コントローラに内蔵されたマイクロコンピュータが各ペルチェ素子を PWM 制御する．コントローラは RS232 通信で PC に接続され，ゲームの状況に応じて側面二枚のペルチェ素子が駆動される仕組みである．コントローラ背面をスリット状にし，ペルチェ素子及び駆動トランジスタ表面にはアルミ板を取りつけることで冷却機構を付加した．制作したコントローラデバイスの仕様を表 4-5 に示す．



図4-53 左：コントローラ前面，中央：コントローラ背面，右：側面に配したペルチェ素子[117]より許可を取り引用

表 4-5 試作したコントローラデバイスの仕様

コントローラ寸法	120x55(最長部：75)x20 (WxDxH)mm
マイクロコントローラ	PIC 16F88
ペルチェ寸法	寸法 15x15x3.8(WxDxH)mm
ペルチェ規格	最大電流 3.0A, 最大電圧 3.8V
ペルチェ制御チャネル数	2
ペルチェ駆動方式	PWM 方式
PC との通信方式	RS-232, 9600bps
駆動電流量	0～1.6A
使用電力	8W (最大)

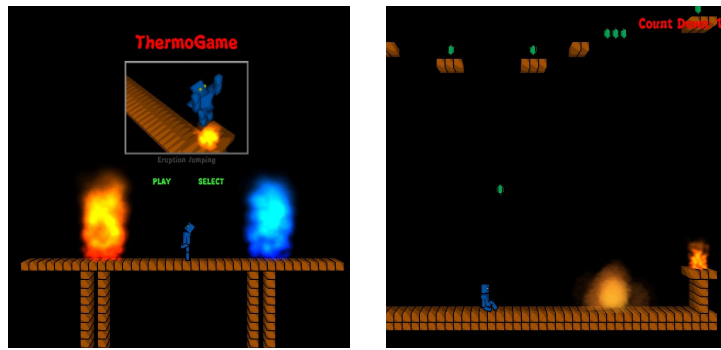


図4-54 左：ゲーム選択画面，右：試作したゲーム「Eruption Jumping」[117]より許可を取り引用

#### 4.2.1.2.3 ソフトウェア

上記のコントローラを利用したビデオゲームソフトウェア「ThermoGame」を制作した。図4-54 左はペルチェ素子のチェックとゲームセレクト機能を合わせたゲームメニュー画面である。十字ボタンでロボットを操作し、**SELECT** ボタンにロボットが触れると複数あるゲームを選択でき、**PLAY** ボタンにロボットが触れる選択したゲームをプレイできる。画面両端の赤と青のCG にロボットが触れるとペルチェ素子の温冷が制御できる。図53 右は温感呈示を利用したゲーム「Eruption Jumping」のゲーム中のスクリーンショットである。ランダムに足元から爆発が起こり、爆発時にその場所にロボットを移動しておくと、画面高くロボットが飛ばされ、宝石を集めることができる。画面中の宝石を全て集めることでゲームをクリアすることができる。次の爆発が起こる周辺にロボットが位置している場合、コントローラに実装されたペルチェ素子が温まり、爆発の位置を知ることができる。宝石を集める為に掛った時間が早いほど高得点がクリア時に表示される。

#### 4.2.1.3 ユーザ観察

ペルチェ素子の温度変化は、30msec 程度以内の反応速度を必要とするビデオゲーム入出力において、十分な変化速度を有しているとは言い難い。ただし本研究で制作したゲームのように、それ程反応速度を必要としないコンテンツにおいては、有効に機能する可能性があると判断した。そこで制作したビデオゲーム「Eruption Jumping」をユーザにプレイしてもらい、ユーザがゲームを進める様子をまずは観察した。観察の結果、徐々に爆発位置を見つける速度が向上し、結果として高スコアを得る傾向が見て取れた。ユーザから「視覚を利用しない、障がい者でも楽しめるゲームが制作できるのでは」や「慣れてくると極端な温度変化でなく、僅かな温度変化も変化速度が早ければ感じ取れる」、等の有益な意見を得ることができた。

#### 4.2.1.4 考察

ビデオゲームは一種だけである。まずは多くのゲームインタラクションを呈示するため、温冷感を利用したゲームシステムを提案する。

温冷感を効率よくユーザに提供する為には、ペルチェ素子との接触部位や温度変化値等に関する

考察が必要となる．これに関しては本研究と並行し基礎実験を行うことで，実験結果を随時本研究に反映させていった．ペルチェ素子を駆動してからユーザが「暖かい」「冷たい」と認知する間のデバイスの出力性能との遅延について温度変化と速度と反応時間に関する実験を行った．その実験では，本コントローラデバイスにおいてユーザに温冷呈示を気づかせる場合，少なくとも2[s]程度の呈示時間が必要であり，ゲームの難易度によって1~2[s]の調整が必要であることがわかった．

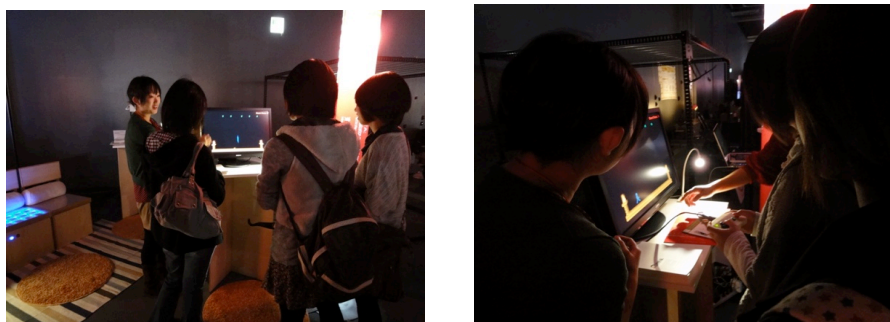


図 4-55 ASIAGRAPH2011(DCEXPO2011)での展示風景

#### 4.2.2 サーモチェア

"Thermo-Chair" は温度感覚をインタラクティブに伝達する椅子である．温度による触覚表現を温度情報として伝達する可能性を日常生活の中で提案した．温度による情報通信は，映像による視覚情報の伝達や音による聴覚情報の伝達と違い，そのものを触った本人にしか伝わらない情報の伝達方法である．視覚や聴覚のような情報量の伝達は難しいが，アンビエントな通信手段として例えば，感情表現のような感性を温度情報として伝える手段や人に知られることなく簡単な情報を呈示することができる情報手段として開発の可能性がある．そこで日常生活の中の椅子に注目し，人間が座ることが可能な強度と40mm角のペルチェ素子による温度を体感できる構造をもち座面の温度をインタラクティブに変えることのできる椅子を作成し展示を行った．[114]

ここでは，その制作方法と展示から得た観察から日常生活で使用可能な温度呈示による触覚コミュニケーションの伝達について考察する．

##### 4.2.2.1 システム概要

椅子の座面に40mm角のペルチェ素子12個を配置し，座面そのものが温冷の切り替えができるようプログラムされた．ペルチェ素子の温度は，0度～43度の温度呈示をする．冷感表示時は青のLED 摂氏0-25度，温感表示時は赤のLED 摂氏25-43度，低温やけどを考慮し，1分間の温度呈示をおこなった．ペルチェ素子の表面には0.01mmの透明フィルムを覆い，温度の電導速度をあげつつ，汚れや耐久性など椅子としての機能を保持している．

椅子の側面に設置したボタンと，赤外線通信による複数のコントロールが可能である．

椅子の座面は，ペルチェ素子の周りをポリカーボネイトで強化し，150kgの体重に耐えるよう設計されている．制御部分，電源部分が椅子の内部に設置され，椅子が単体として機能するよう設計されている．

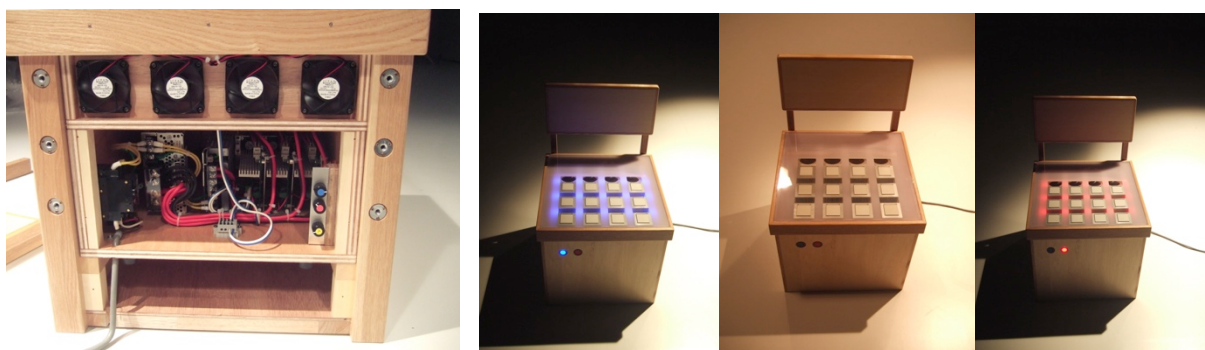


図4-56 システム内部

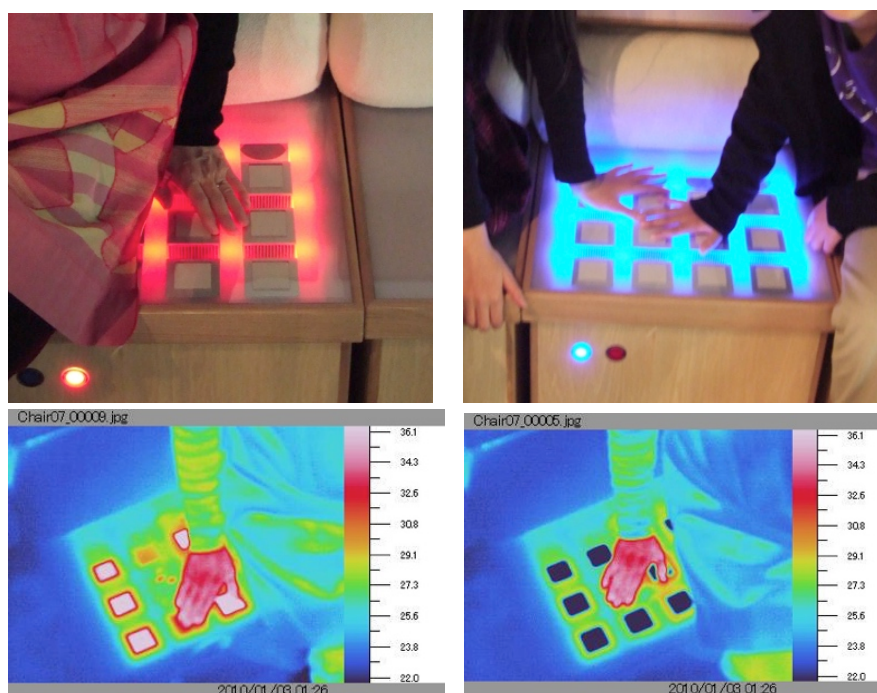


図4-57 温度変化を示したサーモグラフィーカメラ画像

#### 4.2.2.2 ユーザ観察

大阪科学技術館(図 4-59)での常設展示および日本科学未来館での ASIAGRAPH2011(図 4-60)での3日間の展示から、体験者の意見や観察をおこなった。体験者の意見として、「今までにない椅子で面白い」「会議の白熱中にこの椅子があったら会議が冷静になれるかもしれない」「離れた場所へアンビエントに情報を知らせる方法としてユニークである」「おしりがむずむずする」「冷温時トイレが近くなりそう」「椅子が暖かいと心も暖かい気分になる」「治療に使えそう」などの意見をいただいた。





図4-58 大阪科学技術館, 常設展示でのサーモチェア 2009

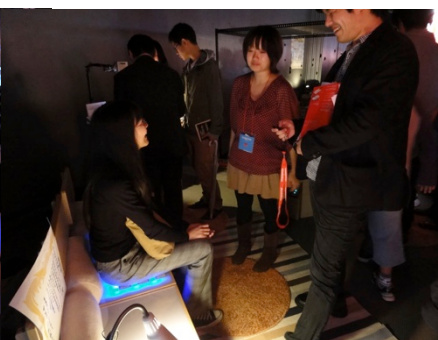


図4-59 日本科学未来館, ASIAGRAPH2011(DCEXPO2011)でのサーモチェア展示

#### 4.2.2.3 考察

体験者からのコメントとして、「離れた場所へアンビエントに情報を知らせる方法としてユニークである」「今までにない椅子で面白い」というコメントがあった。情報を携帯電話で情報を伝える時にも文字や言葉以外に絵文字を使うことがある。文字や言葉以外に状況や感情を伝えることも可能だと考えられる。

「会議の白熱中にこの椅子があったら会議が冷静になれるかもしれない」「椅子が暖かいと心も暖かい気分になる」というコメントは、温度と情動に関連があることを示唆している。筆者は庄司らと 2011 年に温冷呈示インタラクションへの応用を念頭に、実験参加者に温冷呈示を行いな

がら、情動語、表情図形を提示する評価実験を行った.[115] カテゴリー化された情動語群(不安, 悲しさなど)を, ビジュアルアナログスケールを用いた調査で感情度の違いにより序列化し, 温度と感情度を同空間上に布置, 感情に対するイメージと温度の相対関係の実験結果をサーモチェアに利用すると, 温度によって情動を誘発させる椅子も今後の展開として考えられる.

「おしりがむずむずする」「治療に使えるそう」といった意見は, 温冷感覚と身体に関連があることを示唆している. 温度刺激による心身調整法(温冷療法)など今後の展開として考えられる.

### 4.3 温冷呈示ディスプレイのメディア表現を拡張する効果の考察

ここでは、これまでの実装展示から温冷感覚を呈示する視触覚ディスプレイから派生する応用とそこからメディア表現を拡張するどのような効果や知見が得られたかの考察を述べる。

#### 4.3.1 温度呈示と視覚・聴覚感覚の連動による技術の拡張について

##### 技術的な新規性

工学的な技術の新規性として、2件の特許を取得した。1件目は従来技術である視覚のディスプレイに対し、表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した温冷呈示を視覚と同一箇所に表現を感受することができるディスプレイ装置に対してであり、2件目は反応速度に遅延のある温冷の特性に対して呈示温度を制御することで画像にあった温冷呈示のできる制御方法に対して取得した。

#### 4.3.2 人間の体性感覚に即した表現の拡張について

##### 温冷呈示閾値の確認

温冷呈示ディスプレイの解像度に関しては、格子状にペルチェ素子を配置するのに際し、ペルチェ素子同士の間隔が20mm空いている本ディスプレイでは支障なく温度の違いを弁別することができた。しかしながら、凹凸や振動刺激に触覚刺激に比べ温度呈示単独のディスプレイにおいては掌での弁別は弱く、効果的なインタフェースとしてはさらに工夫を行うか、温度に特化した応用を考える必要があることがわかった。

#### 4.3.3 温度呈示と視覚・聴覚感覚の連動による表現の拡張について

##### 1) 温冷呈示体験の新規性について

50 インチ、70 インチ、15 インチ、20 インチ、9 インチの温冷呈示ディスプレイ体験者の観察から温度体験とりわけ冷温体験に驚いたことに多くの観察が得られた。これは第3章で調査したように、人間の体性感覚として人間の手掌の冷点の密度が温点より多いことが考えられる。より冷温に関して刺激を多く感じる点で驚きの体験を提供した。また、インタラクティブな体験という点に注目すると日常生活においては想定外での温度体験が乏しいことが考えられる。寒い時には暖をとる。暑い時には体を冷やしたくなる。ヒーターも冷蔵庫も日常生活に必要な道具ではある、温泉やサウナなど温かい場所で体を温め癒しを求める、氷でできたホテルに滞在することで日常とは違う体験を求めることはあるが、それを想定外な場所や表現として体験する例は少ない。また、冷温に触る場面を考えると冷蔵庫やアイスクリームなど冷たいものを触る時には想定したイメージがあり、想定していない場所での体験や触った時の温度が予想を超えると驚きを得ることが考えられる。本研究で開発した温冷感覚ディスプレイは、温度に対する人間の体性感覚と温度体験を効果的に利用し表現として呈示することで、体験者に驚きを提供した例だと考えられる。

##### 2) ユーザが快適に操作できる可動機構と画像が連動するための制御

本開発では、触ったところの温冷触覚呈示と画像がともに連動して気持ちよくインタラククションすることを心がけた。そのためにインタラクティブに描画できる高速CG画像生成方法の工夫と



高速で反応するタッチセンサーを採用した。その結果ストレスなくスムーズで触覚呈示と映像のインタラクションのわかりやすいインタフェースを実装できたと考える。

本開発の温度呈示速度は、ゲーム機に使用するような反応速度を持っていないにもかかわらず、温度の変化のインタラクションを感じ取れた要因として、温度と映像や音の合致するイメージを制作した工夫や初期温度呈示を早くし、ある程度持続させると温度を制御する制御方法の工夫がある。また本間らの鏡を使用したラバーハンドイリュージョンの実験でもあるように、映像のイメージによって触覚に影響を及ぼすことが考えられる。加えて鈴木らが触覚刺激に無関係な聴覚刺激を付加することで、触覚の粗さ知覚に影響をおよぼすことを明らかにしたように音によって触覚が影響されることも考えられる。冷たい映像やそれにあった音を呈示すると触覚も冷たく感じられる。物理的にも冷たくすると、実温度より増幅されより冷たく感じるができることと考える。すなわち、映像や音が加わった温度触覚刺激は、少ない温度変化で効果を得ることができるのではないかと考える。それゆえに体験者は少ない温度変化にもかかわらず予想より冷たく感じ驚いた様子が観察されたと考える。

### 3) 触覚と画像の一致によって臨場感の増幅

温冷呈示コントローラの試作では、ゲームコントローラとして温冷呈示デバイスが驚きとこれまでにない新鮮な温冷ゲーム体験を体験者にもたらしことが観察された。触覚呈示が加わることで映像だけでは得られない相乗効果が得られるのではと感じられた。また、人間が触っている体験の様子を見ることで、視覚だけの刺激とは違い触ってみたいとわからない触覚体験ならではの体験方法に興味湧き、触ってみたいくなる要因や驚き楽しくなる要因が増すことも考えられる。触覚呈示を伴ったゲームデバイスは任天堂のWiiをはじめこれまでも幾つかあるが、温冷呈示できるデバイスによって今までにないゲーム表現がエンターテインメント分野でも期待できると考える。感覚統合による新しい表現や刺激が応用できると考える。

### 4) ディスプレイサイズによる体験方法の違い

ディスプレイのサイズによって体験方法の違いが見られた。9インチ、15インチ、20インチディスプレイでは指先で表面の温度を触るだけでなく掌を押し当て、滑らせる行為があった。

9インチ80ピクセルのディスプレイでは掌に温冷を同時に触ることによって得られるサーマルグリルイリュージョンのような触覚の錯覚を引き起こし、小型で解像度の高いものならではの温度体験を提供することができている。

50インチ、70インチサイズのディスプレイでは体を載せたり、頬をついたり、腕全体をディスプレイに押し当てる行為が見られた。触る部位によって楽しみ方も異なり、サーモチェアでは、臀部で温度を感じるによって、ムズムズした感覚を提供した。2015年電通大のユリアラビリンスは、臀部に冷温を当てることによって尿意を感じるシステムを提案している。この例からも体の部位によって皮膚表面で温冷を感じるだけでなく、温冷を感じることでむずむずしたり、尿意を感じたり、汗をかくなど体の深部まで及ぼす効果が予想される。これは、例えば、体の機能の衰えた人間に対し、温度刺激を与えることで機能を気づかせたり、回復させたりことに役立つかもしれない。

## 5) コンテンツによる体験方法の違い

暖かい映像イメージで温呈示をした時には、暖炉に手をかざすようにディスプレイに手をかざす様子も伺えた。冷たい雪イメージで冷温呈示した時には、雪の粒を指先で押しじっくりディスプレイ面に手を当てて手の平で冷たさを感じようとする動作がみられた。ディズニー映画「アナと雪の女王」のシーンを真似て氷の映像を作り出す姿もみられた。映し出される映像イメージに習った動作や行動をみることができた。このことから、コンテンツによって体験の動作が大きく影響されることが分かった。

### 4.3.4 持続可能な体験手法について

#### 1) 何度も体験してもらうためのコンテンツの工夫

コンテンツの体験時間を考える必要がある。温冷コンテンツでは3つの異なった映像を各1分用意し、1分ごとに自動的に変わっていくようにプログラムを行った。体験者は飽きることなく異なった映像を体験できていたようだが、気に入ったコンテンツを何度も体験したい体験者もいたことを考えると体験者が自分で選べるという選択もあると考える。また一度だけの体験で満足することなく何度も体験してもらうための工夫として、ポケモンゲームに代表されるように、バージョンアップやコレクションが貯まるようなゲーム要素を入れたコンテンツの開発もある。コンテンツの体験時間は、一度に何人間で体験ができるか、ディスプレイの大きさによっても変わる。

#### 2) 知的好奇心を刺激する工夫

温冷呈示ディスプレイは、どのようなデバイスを使用したかわかるようにディスプレイ表面にフロストアクリルを使用し内部の構造が見えるような工夫をした。このことで、立体的に映像がプロジェクションされる美術表現の面白さと同時に科学的な知的好奇心を刺激する効果を狙っている。体験者が自ら何かを発見できる喜びの余地を残すなど、遊びのようなエンターテインメントの要素と先端技術の面白さを伝えるためのバランスが必要になると考える。

#### 3) 公共の展示物としての安全性配慮したアクセシブルなインタフェース

公共の場において、老若男女に体験してもらう配慮として、安全に体験してもらう工夫がある。ディスプレイの低温・高温やけどをしない安全な呈示温度、躯体の壊れにくさ、ディスプレイ面の高さなどに安全性に配慮した設計が必要であり、本章で開発したディスプレイは、その条件を満たしている。

#### 4) 展示品としての耐久性

メディアのハードウェアやソフトウェアに依存することの多いインタラクティブメディア作品が抱える課題の一つとして作品の寿命がある。体験者の頻繁な使用に対し、安全に長期の展示に耐えうるか。年代を経た作品を再現可能であるか技術的にも躯体設計にも課題がある。本章で開発したディスプレイは、科学館での2年間以上の常設に耐えている。また2015年4月1日か

ら9月31日までの6ヶ月間、首都大学東京にて10:00-17:00の展示時間で温冷呈示50インチディスプレイの常設展示をおこなった。ここでの課題は、開発時のコンピュータ(Windows2000,XP)のプログラムが最新バージョンのコンピュータ機器に移行し再現が可能であるかであったが、無事実装することができ、プログラミングや設計回路の保存など詳しい資料を保存することで再現が可能であることがわかった。美術館や科学館でメディア作品を収蔵し、アーカイブする問題として、再生する周辺機器も一緒に保存しなければ作品の再現ができない課題があるが、作品を論文化し記述することで残る作品の残す方法の重要性を改めて認識できた。

#### 4.4 結論

視触覚ディスプレイの開発にあたり、人間の体性感覚に注目し、温度特性を取り入れた温冷感覚呈示とその応用について述べた。従来技術である視覚のディスプレイに対し、本研究では、表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した温冷呈示を視覚と同一箇所に表現を感受することができるディスプレイ装置を開発した。温冷呈示ディスプレイの制作にあたり、試作19インチディスプレイ、大型ディスプレイを制作し、その制作物の展示をおこなった。そこで得られたヒアリングを元に、温冷呈示の定量化の実験をし、その結果をもとに9インチ80ピクセル小型ディスプレイを制作し、小型ディスプレイを制作した。小型化の応用としてゲームコントローラに使用した例と生活の中での使用の応用として椅子に組み込んだ例を制作し、その展示をおこなった。

本章では、視触覚ディスプレイの開発にあたり、人間の体性感覚に注目し、温度特性を取り入れた温冷感覚呈示ディスプレイの開発と表現、その応用について述べた。これまで従来技術である視覚のディスプレイに対し、本研究では、表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した温冷呈示を視覚と同一箇所に表現を感受することができるシステムとして技術的に2件の特許を取得したディスプレイ装置を開発できた。そこから温冷呈示ディスプレイ呈示には格子状にペルチェ素子を配置するのに際し、ペルチェ素子同士の間隔が20mm空いていると支障なく温度の違いを弁別することがわかり、本ディスプレイの温度弁別性能が確認された。また、温冷呈示と画像をインタラクティブに一致させる制御方法の工夫によって温冷呈示によって参加者に新しい体験を提供できたことが行動観察やアンケートからわかった。メディア表現の拡張手法として、工学からのシステムの組み合わせと制御手法を示した。人間工学から温冷呈示の弁別性能の確認し人間の体性感覚に即した開発手法を示した。その結果を生かしメディア表現から視触覚ディスプレイを使用した新しい体験のメディア表現が可能となった例としてひとつの表現創出のための拡張の効果があったという結論が得られた。

## 第5章

# 砂状硬軟感覚呈示ディスプレイによる表現の拡張

### はじめに

本章では、表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した砂状の硬軟呈示を視覚と同一箇所に表現を感受することができるディスプレイ装置を開発した。その呈示のために第4章の温冷呈示手法と同様のテーブルトップシステムを使用した。温冷呈示では外観からの温冷呈示されていることがわかりにくく、手がディスプレイ面を触ることで初めてわかる感触のため感覚を共有することが難しい点があった。ここでは、素材を変えることで参加者の共有意識や参加性のある触覚呈示ディスプレイができないか考えた。その結果、砂場のような場を想定し砂状の素材によるさらさら感ずっしり感の感触を呈示可能な素材や制御方法の検討をした。使用素材として、微小なスチールボールを使用した硬軟ディスプレイを制作し、その制作物の展示をおこなった。さらにその砂状硬軟呈示ディスプレイを使用したワークショップをおこなった。ここでは、その開発とそれに対応したコンテンツの制作と実装展示、ワークショップについて述べ、電磁石を使用した視触覚ディスプレイの開発と応用とそこから得られた効果やメディア表現の拡張のための効果について考察し論じる。

### 5.1 砂状硬軟感覚呈示ディスプレイの検討

砂を触ることで、人は楽しみや安らぎを得る。砂を集めた砂場では、砂を手でなでて形を描いたり、寄せ集めたり、固めたりすることで色々な造形物を作ることができる。砂の素材の特徴として、さらさらとした流動性と造形物を自由に形づくれる可塑性があげられる。砂場のなかに、石や枝や電車のおもちゃなど入れて風景の見立て遊びをすることもある。自由に造形ができ、遊びを通じて創造力を培うことができ、共同で作業して遊ぶことができるという観点から幼児教育に使われる[116]。また、癒しや「箱庭療法」[117]などの治療効果として使われる。海辺の砂を使用し、大規模な造形物をつくるサンドアートなど、多様な人々に楽しみを提供できる素材と考える。

本研究は、砂場のような楽しみを共有できる場の構築をインタラクティブなディスプレイを使用して提供することを目的とする。そのために砂のさらさら感、ずっしり感を呈示できるインタラクションのある視触覚ディスプレイの開発とコンテンツの提案をする。

触感に関する因子分析として、オノマトペ（擬音語・擬態語）と触覚に注目した研究もある。「日本語オノマトペ辞典」（小学館）やデザインの分野でも阿部らの触り心地を集めた「ハプティック・ディクショナリー」、荒牧らの身体の部位とオノマトペを対応させた「オノマトペ芳

ーさん」など文化系からのアプローチもある。早川・松井・渡邊らの「オノマトペを利用した触り心地の分類手法」[118]や白土・前野の「触感呈示・検出のための材質認識機構のモデル化」[119]など工学系からオノマトペと触覚呈示の分類を試みている。オノマトペを通じ文化系，工学系からクロスしたアプローチがある点が興味深い。

砂のさらさら感とずっしりする感触を同じディスプレイ面で呈示するために砂状の表現に小粒スチールボールを使用し，触った場所に応じて電磁石によって硬さを制御し，スクリーンそのものの砂状の触感と映像がインタラクティブに制御されたシステムを開発した[120]。

砂を使用したインタラクティブな表現の先行作品として，Jean-Pierre Hebert らの「Sisyphus and Ulysses」(1999) [121] は，砂の上を動く鉄のボールが，軌跡を描く作品がある。

砂鉄と電磁石を使用したによる制御による例として，古くは 60 年代キネティックアートのグループ T で活動していた Davide Boriani 「Superfici magnetiche」1959[122]や 64 個の電磁石が設置された台の上の砂鉄が音楽に合わせてダンスする David Durlach の「Dancing Trees」1989[123]がある。ATR の安田らの「Sumi-Nagashi」[124]は，電磁石の同極を合わせた時の反発特性を生かし，墨流しの画像と描いた時の感触を一致させることを試みている。

電磁石を使用した例として，石井らによる Actuated work bench[125]では磁力の特性を活かし電磁石のオンオフによって上に乗せた磁性流体が変化することによって情報提示できる。電磁石の解像度や細かな制御は難しいといえる。Follmer らが開発した inFORM[126]ではユーザの手の動きをディスプレイ上に表示し，3D 表示が可能だけでなく上に置かれたオブジェクトを移動させたりカメラで読みこんだ人の手の動きなどを表現できる。金井らによる PocoPoco[127]は音楽演奏用インターフェースでありながら，動きと光りによって情報を可視化，可触化出来るデバイスを開発した。ソレノイド機構を利用することによって音と同時に上下動するユニットを，押す，掴む，回すといった操作が可能である。ユーザはユニットの操作によって音にエフェクトをかけたりスイッチを入れたりする操作は可能であるが，ディスプレイとしての用途も期待出来る。

また，砂状の微小な素材を利用したインタラクティブ研究として MIT の「SandScape」[128]は，砂素材の凹凸に対応した画像をインタラクティブに表示する。「AquaTop Display」(2013)[129]は，深さのある水槽状の箱に投入された微小発泡ビーズを下部よりエアコンプレッサーで空気を噴射させそこに画像をインタラクティブに投影することで，画像のインタラクションのある噴水のような効果を得ている。「Pixei Dust」(2014)[130]は，超音波アレイを使用し微小な発泡ビーズを空中に浮かせるディスプレイである。しかし，砂場の砂のように手に取り，砂の触感がインタラクティブに変化するディスプレイはなく，本研究は新規性があると考えられる。

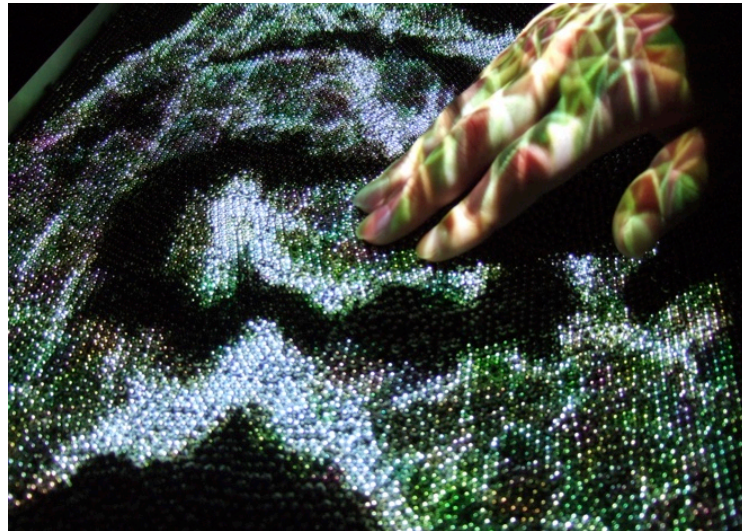


図5.1 「Magnetosphere」

## 5.2 システム構成

本研究の視触覚感覚呈示ディスプレイの開発にあたり，インタラクティブな視覚の切り替えが可能でありかつインタラクティブな触覚感覚が呈示でき，画面を触ったところの視覚と触覚呈示が対応していることを2,5,6章の共通要件としている．それぞれのディスプレイで触覚呈示する素材により使用する機構を変えている．本章では砂状のさらさら硬軟触覚呈示のために電磁石とスチールボールを使用した，

システム図を図5.2に，仕様を表5.1に記す．ディスプレイ裏面に電磁石を接触させとその上部に直径1.2mmの錫鍍金のつや消しスチールボールを深さ3cmに敷き詰めた深さのあるディスプレイを制作した．敷き詰められた電磁石に直流電流を流すことにより，磁場が生じる．スチールボールが磁場の強さに応じてインタラクティブにスクリーンそのものを硬くしたり，やわらかくしたりする．また，タッチパネルにより，スクリーンに触れた位置，時間を検出し，それに合わせてインタラクティブに画像及びディスプレイの柔らかさが変化する．

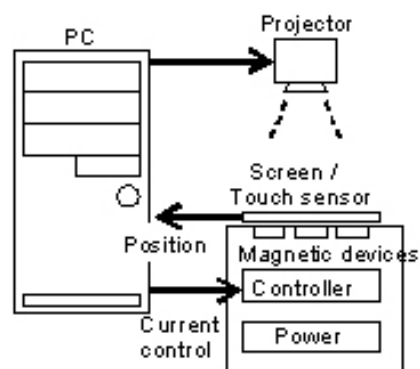


図5.2 システム構成図

### 5.2.1 技術選定理由

硬軟感覚を呈示する手法として、熱や空気、電磁石などの手法がある。

熱を加えることで油脂やプラスチックなど素材そのものの柔らかさが変化する。熱の反応速度と素材の可塑性に時間差がある問題点がある。エアコンプレッサーなどを使用することにより空気の圧力を制御し、エアによる素材の圧迫による硬軟が得られる。

エアコンプレッサーの音や海外での機材の搬入不可など展示の問題がある。電磁石による制御は、インタラクションの応答性や電磁石の性能選択の豊富さや電氣的制御の扱いやすさを鑑み、電磁石を採用した。

電磁石仕様に関しては、玩具安全基準(ST-2002) である磁束指数  $50(\text{kG})2 \cdot \text{mm}^2(0.5\text{T}2\text{mm}^2)$  未満を満たすことを前提とし、電圧 6VDC, 抵抗  $4.5\Omega$ , 電流値 1333mA, 消費電力約 8.0W (連続) である信明電機の SS-120-4-1B 6V を選び、個数 6.7Wx 192 個, 取り付けピッチ 60mm x 60mm の設置をした。なお、重さ軽減のため、SS-120-4-1B 6V の外枠を外した加工をした。

### 5.2.2 ディスプレイサイズ

大きさインタラクティブディスプレイは、ディスプレイ裏面に12×16 合計192個の図3のような電磁石を接触させ、1個1個を各個制御できる50インチの装置を開発した。展示運搬を考え、脚部着脱式テーブル型のテーブルトップディスプレイとした。テーブル型のディスプレイにすることにより、砂状のスチールボールを敷き詰めることが可能で、なお且つテーブルを囲んで四方からの観客の参加を可能にしている。人間は視野角20度を境に臨場感が増し、約80度から100度で満足し、110度で飽和するとされる。[131]このことから、砂場遊びの没入感を得るためのサイズとして50 インチディスプレイを選定した。

### 5.2.3 タッチパネル

画像に触った位値を検出する方法として、カメラを使用し画像処理で手先を検出する方法や敷き詰められた電磁石に直流電流を流すことにより、磁場が生じる。光学式タッチパネルにより、スクリーンに触れた位置、時間を検出し、それに合わせてインタラクティブに各電磁石の制御と画像を生成できる。

### 5.2.4 スチールボール

電磁石を配置したテーブル面の上部に直径 1.2mm の錫鍍金のつや消しスチールボールを深さ 3cm に敷き詰めた。砂の粒子近似直径は 1/16 インチ~2mm である。そのサイズに近いスチールボールを選んだ。また、映像がスチールボール表面に投影されるように、スチールボールの表面に白色に近い錫メッキの加工とつや消しの加工をした。その加工により、スチールボール表面に投影された映像が鮮明になった。また、スチールボールの表面に微小な凹凸ができることで触った時のさらさら感が増し、砂のさらさらした触感に近い素材になった。スチールボールが磁場の強さに応じて引きつけられることで、スクリーン上に敷かれた砂の触感が磁場のない時はさらさらし、磁場の強い時は引きつけられ触感が、波打ち際の砂が重く感じるような重い、粘度の高い、湿度の高い、あるいは硬い触感のように感じさせることができる。



### 5.2.5 制御方法

制御方法としては、電磁石 4 個を 1 グループとして 8 bit のデータでグループごとに制御する。グループを指定するため 7 bit を使用する (128 グループ指定可能)。指定されたグループのデータをドライブ回路側で保持させる (1 bit 使用)。またノート PC での制御も可能なように USB を使用したデジタル I/O とした。以上により全体にかかる消費電力、使用コスト、重量が減り、より利便性の向上が得られた。また、システムの安定によって、様々な多くの観客に展示物の体験が長期間に渡り可能となった。

表 5.1 システム仕様

内容	仕様	備考
対象となる体験者	子供～一般	
外形	テーブルトップディスプレイ 外形寸法: 幅 1120mm 奥行 924mm 厚み 175mm (脚を含めた高さ 700mm) 材質: 本体/シナ合板・脚/スチール	脚部着脱式テーブル型
硬軟感覚を呈示	電磁石の使用 玩具安全基準(ST-2002)	磁束指数 50(kG)2・mm <sup>2</sup> (0.5T2mm <sup>2</sup> )未満
内蔵電磁石: 個数, 間隔	6.7Wx 192 個 (取り付けピッチ 60mm x 60mm)	
ソレノイド仕様	電圧 6VDC, 抵抗 4.5Ω, 電流値 1333mA, 消費電力約 8.0W (連続) 絶縁特性 DC500V メガ 100MΩ 以上, 耐電圧 AC1000V 50/60Hz 1 分間, 絶縁階級 A 種	
スチールボールの直径	砂の粒子近似直径は 1/16 インチ～2mm スチールボールの直径 1/16 インチ	1.2 m/m, 1/16 (直径 1.5875mm), 3m/m, 3/16 をテスト
映像が投影できること	スチールボールに加工: 錫メッキ, つや消し	白塗装, 鍍金をテスト
映像投影サイズ 映像の没入感	視覚視野角 110 度 投影サイズ: 1016mmx 762mm (50 インチ 4:3)	
インタフェース	USB1.1 (制御・赤外線イメージセンサー方式タッチセンサー, 上部両端の二つのセンサーを利用した三角測量方式, USB ハブ内蔵, 5V (USB バスパワー) 約 1.5W)	
タッチセンサー速度	応答速度 10ms (100 ポイント/秒) 赤外線イメージセンサーを利用した三角測量方式	付属のドライバーを使用することでマウス相当として使用可能
インタラクティブに映像と触覚が反応	高速画像処理グラフィックボード搭載	
負荷制御方式	付属のドライバーを使用することで 16bit I/O としてアクセスする	負荷 8 個を 1 チャンネルとして扱う D0～D7: 各 bit を H[1] とすることで負荷を ON にする D8～D14: D0～D7 を出力するチャンネルを指定する D 1 5 : D 1 5 b i t を H [ 1 ] > L [ L ] とすることで指定したチャンネルの D 0 ～ D 7 を確定する
電源／消費電力	入力 制御/負荷駆動電源 85V ～ 254V AC ／ 最大 1500W 出力 負荷駆動電源: 5VDC 240A / 制御電源: 12VDC 12	



図5.3 躯体内部のソレノイド配置状況

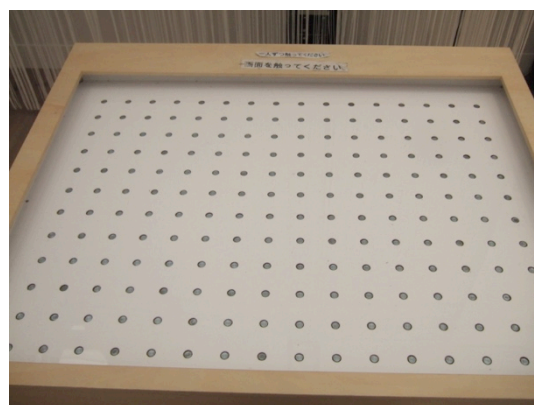


図5.4 躯体内部の上部にアクリルカバー設置



図5.5 システム状況



図5.6 映像テスト

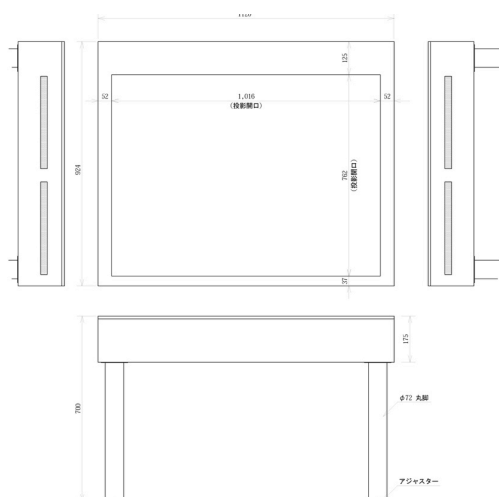


図5.7 躯体展開図

### 5.2.6 画像生成

画像生成部では、イベント部から送信された情報を基にC言語、ライブラリはOpenGLを使用して3次元でのリアルタイムの画像生成をおこなった。電磁上に散りばめられた小さな鉄球によって創り出される触覚の感覚に連動した映像を提供している。

### バネのシミュレーション

磁気によって引き寄せられるような粘り気のある映像は、バネのシミュレーションを基礎にしたアルゴリズムを独自に開発した。テクスチャーは、アルファ合成により各三角ポリゴンに2つの画像を重ね合わせて、立体感を表現している。

オブジェクトの形状はランダム性を持たせるために、格子状のメッシュを三角形に分割し、乱数で頂点を動かしている。アニメーションは、運動の第二方程式から張力を計算し、それぞれのポリゴン頂点にこの張力の値を代入することにより、ポリゴン頂点を移動させている。

$$F=ma \quad F: \text{力} \quad m: \text{質量} \quad a: \text{加速度}$$

アニメーションごとに頂点同士を結ぶ辺の長さを計算し、初期値の任意の倍数で張力の計算から外し、結合を断っている。(図5.8) 伸び縮みは、一箇所でも引っ張られると、他の点もつられて動く。また減衰率を加えることにより、時間が経つにつれ伸びが元に戻る減衰振動を可能とした。テクスチャーは、アルファ合成により各三角ポリゴンに2つの画像を重ね合わせて、立体感を表現している。

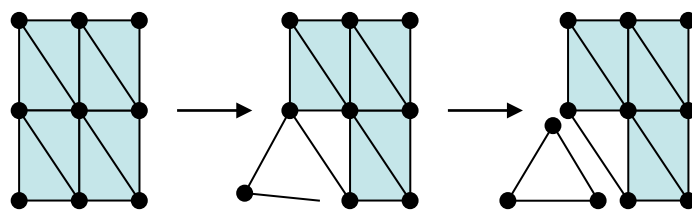


図5.8 オブジェクトの形状モデル

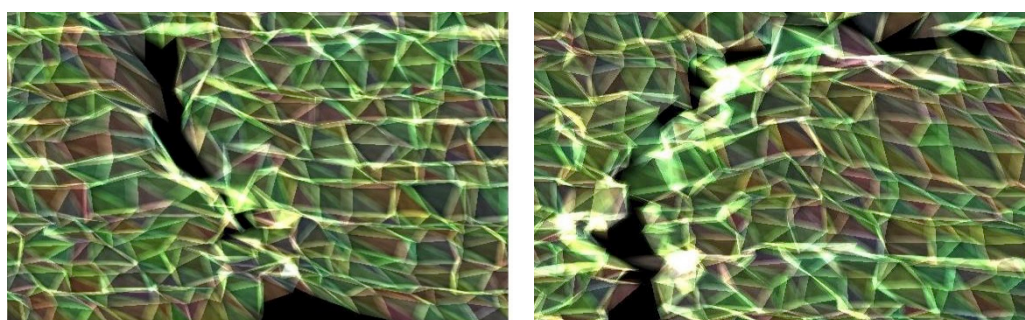


図5.9 バネCGシミュレーション画像

### メタボールの画像

磁気によって引き寄せられるような粘り気のある映像として、メタボールを使用した濃度球のシミュレーション画像の投影をおこなった。メタボールとは、3次元グラフィックスで曲面を表現する手法の一つで、球体など単純な曲面を持つ複数の立体を融合して、滑らかな曲面の表面を

持つ立体を定義する方式である。球を描くとき濃密になる濃度の分布関数として与えられる。様々な濃度勾配を持つ球を空間中に近づけて配置すると、それらの間の空間には濃度が重なりあって外縁部よりも濃くなる部分が現れる。このとき、ある特定の濃度を持つ点を繋ぎあわせて面を定義すると、配置された球が滑らかな曲面で繋がった立体図形を構成することができる。砂の可塑性や形を自由に変えられる特性とメタボールの有機的な濃度球のイメージが重なり砂の触感を増幅すると考えた。青から赤へ濃度の違いを表現し、球を手で集めることによって、互いの球が有機的につながり砂を集める行為と画像が一致するように画像と駆動部分が制御されている。

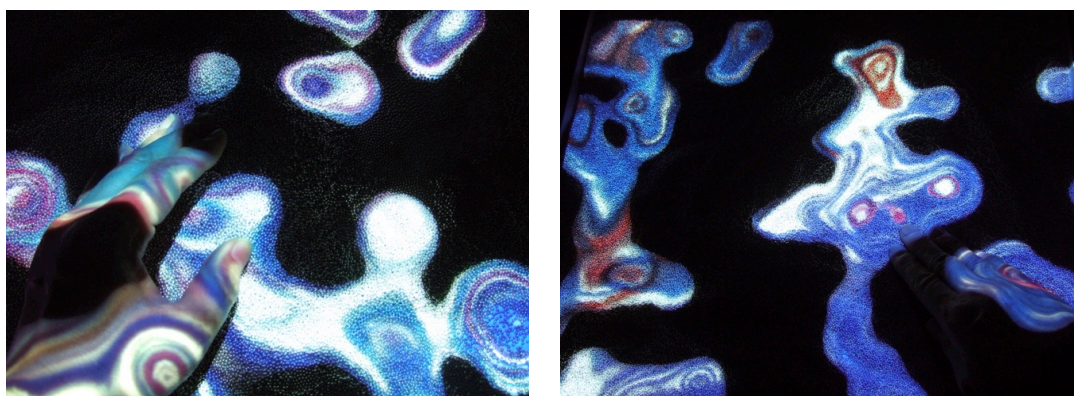


図5.10 メタボールCGシミュレーション画像

### 5.3 表現

映像と駆動部分の特性をいかに融合させてコンテンツを提供するかが、表現の重要なポイントとなる。バネのシミュレーション画像では、観客の触った手先の位置をタッチパネルで検出し、インタラクティブにその位置の電磁石がONになり微小なスチールボールが引き寄せられるよう制御されている。同時にバネの映像は触った位置から変形するようにプログラムされた。画像と電磁石が手の位置情報に連動して制御されるため、画像では触ったところが黒く引っ張られる映像になり、実物体の微小なスチールボールの砂の触感は重くなる。観客はこの映像イメージと実物体のスチールボールの触感の変化を同時に体験することで、重く引っ張られるような湿った砂のような触覚を感じることができると考えた。砂のさらさら感触から一気に重い砂の触感に実物体である砂の触覚と映像イメージである視覚が同時に刺激されることで、体験者にこれまでにない視触覚体験を提供する。

メタボール画像では、砂の可塑性や形を自由に変えられる特性とメタボールの有機的な濃度球のイメージが重なり砂の触感を増幅すると考えた。青から赤へ濃度の違いを表現し、球を手で集めることによって、互いの球が有機的につながるよう画像が生成された。メタボールのシミュレーション画像では、メタボール球の画像の位置の電磁石がONになり、タッチパネルで検出された体験者の触った手先の位置の電磁石がインタラクティブにOFFになり微小なスチールボールが引き離されるよう制御されている。集めたメタボール画像の部分が電磁石のONによって硬くなり、メタボール画像も集めることで融合形を変形させるので、体験者はその砂の画像と触感の変化を



楽しむために積極的にメタボール画像の投影された砂を集める行為をするのではないかと考えた。

画像の違いと触ったときの駆動部分の動きの違いを出しかつ体験者を飽きさせないために2種類のコンテンツが2分おきに自動的に変わるようにプログラムした。このことにより、体験者はそれぞれの画像で行った砂の触り方や楽しみ方を体験できると考えた。

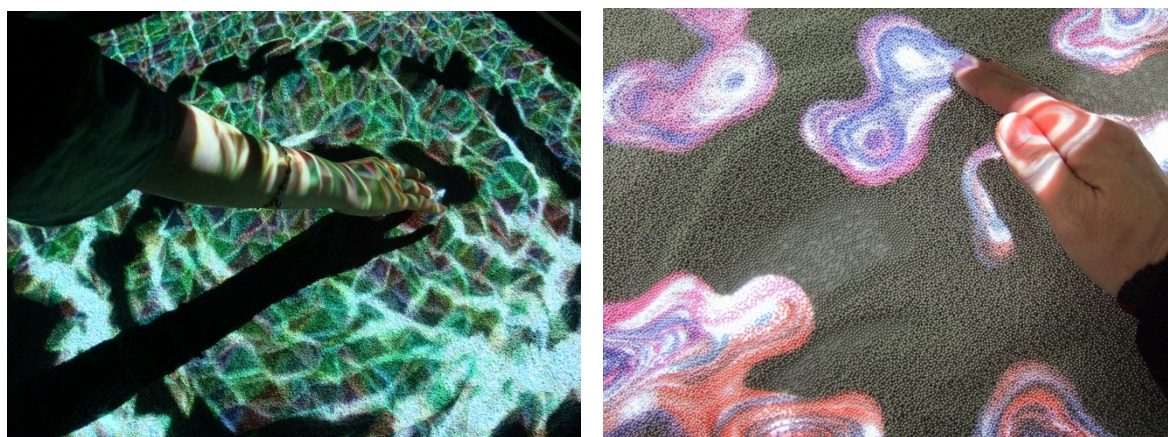


図5.11 画像投影時の砂状硬軟呈示ディスプレイ

## 5.4 観察とヒアリング

本システムは日本科学未来館でのASIAGRAPH2008/DCEXPO2008（来場者45,512人）と文化庁メディア芸術祭未来研究所2009（来場者55,243人），日本科学未来館未来研究所2010において実演展示を行い，多数の体験者の体験行為を観察することができた．そこでの特徴のある行動観察とコメントを記す．

### 多数見られた行動観察

- ・体験物から距離10m程度

ディスプレイと他の体験者の様子を見回す．人垣ができていたので興味を示している．体験者の混み具合，どのような表情で体験しているのか，ディスプレイにはどのようなものが写っているのか，具体的な映像の内容はわからないが色や動きを見る．

- ・体験物から距離2m程度

次に近寄って，砂遊びのようなのだとわかる．どのような素材が使用され動きをするのか，触っても大丈夫か安全か判断する．映像と音のインタラクションはわかるが，砂がどのように反応しているのか触覚呈示には気がつかないようだ．

- ・体験物に触れる

実際に触って，砂のような微小なものだが，砂ではないことに気がつく．構造に興味ある体験者はどのような構造なのか，動く仕組みをじっくり観察する．電磁石が使用されていることがわか

ると微小なスチールボールを電磁石に近づけ実験をしている。不思議体験そのものに興味のある体験者は、砂のような新しい感触を手に取り、ひたすら感触を楽しみ、砂遊びで行うようなごっこ遊びをしている。

#### 多数から得たコメント

- ・ 砂が手につかずさらさら感が気持ち良い
- ・ 重たいところがあり、波打ち際のようなウェット感を感じる
- ・ 粘着性がある
- ・ 砂場のように楽しい、嫌なことを忘れさせてくれる
- ・ 山の形に合わせて砂を集めたいくなる
- ・ 子供の頃に戻った気持ち
- ・ 友達を呼んで一緒に遊びたい

#### 少数意見

- ・ 砂と画像がどのような反応をしているのかわかりにくかった
- ・ 知らない人が触ったものは触れない
- ・ スチールボールが床に落ちて掃除が大変そう
- ・ 時計をしていても大丈夫か
- ・ ペースメーカーをしても体験できるか

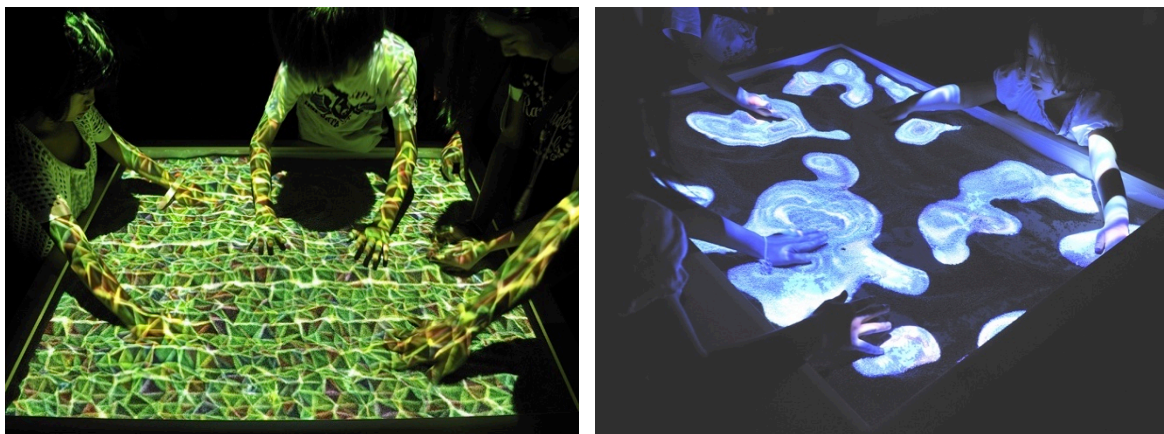


図5.12 ASIAGRAPH2008 実装展示

## 5.5 応用—ワークショップによる遊びの誘発

本章では、この電磁石ディスプレイを使用した応用について述べる。

砂遊びで石やおもちゃの車などを砂場に置き、見立て遊びをする光景を見ることがある。5.2の砂状の硬軟感覚呈示ディスプレイにおいても山や川を作り見立て遊びが観察された。そこで、この電磁石ディスプレイを使用し、ディスプレイに反応する玩具のようなものを置くことでディスプレイのインタラクションが楽しめる体験を考えた。体験のデザインとしてこのインタラクティブな電磁石による硬軟ディスプレイ上にアクティブな触覚を提供する新しい遊具「Tactile Bags

ball」を提案した。また、ディスプレイ上に反応してインタラクティブに光ったり、振動したり、動いたりするものを参加者自ら電子工作するワークショップを開催した。ワークショップを通じ、触覚体験をより記憶にとどめることができると考えた。

これは 5.2 のようにディスプレイそのものが触覚を呈示するのではなく、ディスプレイが磁気を発生させる発生源になり手に持った個々のボールが振動触覚を呈示することに応用のユニークな点がある。本研究は、ACM.SIGGRAPH2014 Studio に採択され発表、展示、ワークショップを行った(図 5.13) [132]。

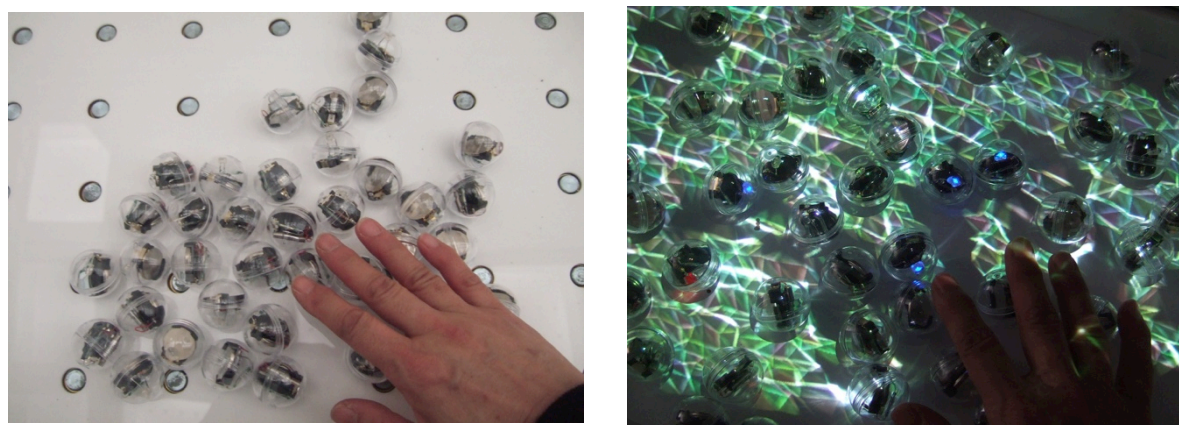


図5.13 「Tactile Ball」

## システム

ボールは、図 5.14 のような直径 3 cm の透明なアクリルボールの中にリードスイッチと小型モーター、LED ボタン電池により構成される。電磁石によって制御されたディスプレイ上に置かれボールそのものが電磁石に反応し、光ったり、振動したりすることで、新しい遊びを換気する。ディスプレイ上に設置されたタッチパネルによりボールを触った位置を検出し、ボールの位置に合わせ画像が連動して表示される。手の中でボールが振動したり、音がなったり、光ったりする遊びは、シンプルな遊びであるがゆえに、造形的な想像力をかきたて、触感の素材の楽しみや生き物を扱うような癒しを提供する。生き物のような動きをする球の触覚と画像及び音がインタラクティブに連動して制御されていることに遊びの新規性がある。ボールを使用した原始的な遊びと、インタラクション技術を結びつけ個々に振動呈示し、子供の手にも収まるボールはユニバーサルな新しい遊びを提供する。これはディスプレイそのものが触覚を呈示するのではなく、ディスプレイが磁気を発生させる発生源になり手に持った個々のボールが振動触覚を呈示することに応用のユニークな点がある。これは、3.2.3 の温冷呈示ディスプレイの上にサーモグラフィーシートを設置しグラフィック情報として示したと同様に、ディスプレイを熱源や磁気源と考えた二次使用としてのディスプレイの応用である。



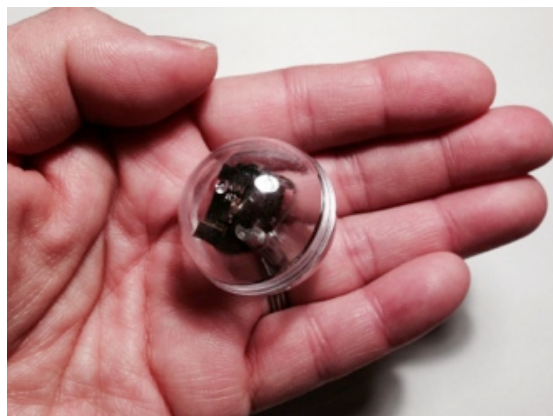


図5.14 Mag Ball 部分

## ワークショップについて

ワークショップは、図 5-15 のような小型のボールを電子工作での制作をする。制作時間は 15 分程度で、初心者にもわかりやすい解説が iPad と人によってされた。図 16 のように、大人も集中して行うことができた。完成した **Mag Ball** を電磁石のディスプレイに置き、振動させたり、光らせたりして遊ぶことができる。手に持ちながら電磁石が ON の場所を探したり、振動する **Mag Ball** の動きを楽しんだり、シンプルな遊びだが手に振動が伝わりボールがアクティブな生き物のように感じる点が興味深い。

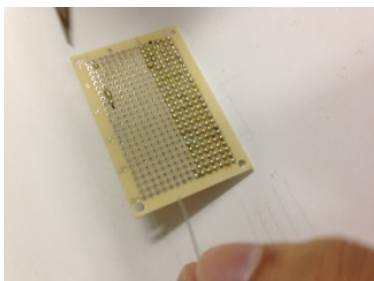
## 観察

電子工作体験を経てディスプレイで遊ぶ体験の観察として、初めて電子工作をした参加者も多く、悪戦苦闘しながら完成したボールは思い入れのある様子が伺えた。自分だけの触覚玩具が実装でき、それを使用して遊ぶことにより触覚体験が身近に感じ、電子工作体験を経たディスプレイでの遊びに充実した様子が観察できた。また、遊びの途中で、ボールが動かなくなると、電子工作の接続部分を確認したりする様子から、中の構造が確認できる透明アクリルを使用した利点があったことがわかった。ボールの動きを応援したり、見守る様子や手の中に優しく入れたりまるで小動物を扱うような様子が観察できた。

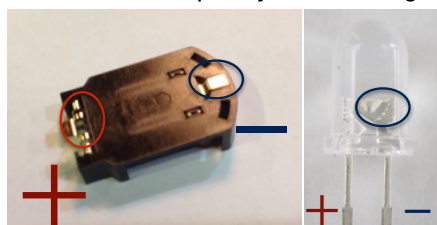
# Workshop Flow

Mag-B: Tactile Sand Play using an Interactive Magnetic Display

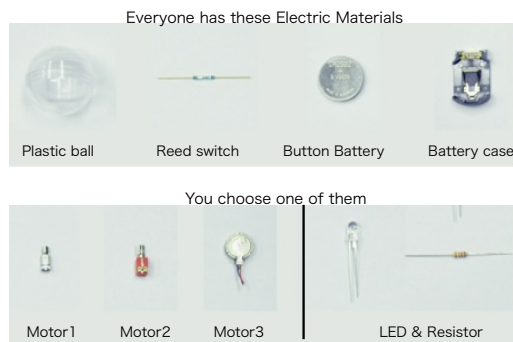
1. To practice soldering with test universal board.



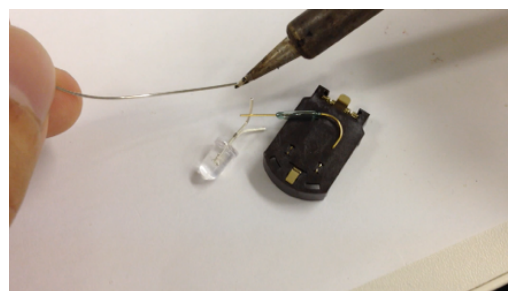
2. To confirm the polarity of switch case and LED.  
You can check the polarity to see the image.



3. To confirm whether there are electric materials.



4. To sold electric materials like samples.



5. Using Mag-B on the sandbox.

図 5.15 電子工作ワークショップの手順



図 5.16 SIGGRAPH2014 での電子工作ワークショップ風景

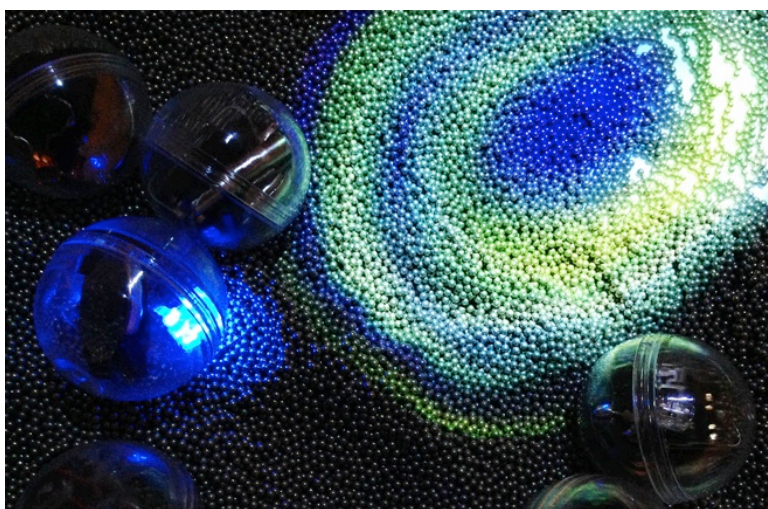


図 5.17 Mag-B: Tactile Sand Play using the Interactive Magnetic Display at SIGGRAPH2014

## 5.6 電磁石を使用した砂状硬軟感覚呈示ディスプレイの考察

### 5.6.1 硬軟感覚呈示体験と視覚・聴覚感覚の連動による表現の拡張について

#### 1) 砂状さらさら硬軟感覚呈示体験の新規性について

さらさらの砂状の微小粒をさわって、はじめは本当の砂であると思った参加者もいた。「砂が手につかずさらさら感が気持ち良い」という意見が多く聞かれた。これは、微小スチールボールにつや消しの錫メッキをしているため、微小スチールボールの表面に分からないくらいの細かな凸凹がありそれが手にくっつかない工夫がしてあるためであり、映像反射せずに砂に投影できるようにつや消し加工をした工夫が触覚としても気持ち良い感触を得ることができたと考える。また、微小スチールボールを砂に見立てて使用する例はこれまでになく、新規性があると考えられる。さらさら感と同時に、波打ち際の砂のように少し重たい、ウェット感を不思議に思う観客も多かった。同じ砂場に2種類の違う感触の砂をインタラクティブに体験できたことが新鮮だった様子が観察から伺えた。これは、このディスプレイで体験する砂遊びが新鮮な驚きをもたらしたと考えられる。

#### 2) ユーザーが快適に操作できる触覚と映像のインタラクティブ性

本開発では、触ったところの温冷触覚呈示と画像がともに連動して気持ちよくインタラクションすることを心がけた。そのためにインタラクティブに描画できる高速CG画像生成方法の工夫と高速で反応するタッチセンサーを採用した。その結果ストレスなくスムーズでわかりやすいインタラクションが実現できたと考える。また、電磁石と砂に見立てたスチールボールの動きと質感に合わせた画像を提案することで、より一層粘着性があるように感じさせたりしたことも成功だった。メタボールの有機的な湾曲に合わせ、砂を寄せ集めたり、山を作ったりする動作も見られた。画像によって人を誘導したり、ゲーム性のあるような画像も人の目に止まり触れることで長い時間留まる可能性がある。

#### 3) 参加性の向上によるコミュニケーションの場の創出

砂場と同様な展示をしたため、自然と人が集まり、個人で黙々と砂遊びをする参加者もいれば、共同で何かの形を作ろうとする参加も観察され、コミュニケーションの場の創出には適した装置であると考えた。温冷感ディスプレイではディスプレイに触ってはじめて温冷が知覚でき体験者個人の手先の感触が強い体験となるが、砂状の場合は、遠くからでも砂場のような設定のため何をしているのか想像しやすく、砂遊びのような共同での作業ができ参加性に優れていると考える。天然の砂のように手にくっつくこともなく、室内での遊びに適し次世代の砂場の提案としても期待がもてた。

### 5.6.2 持続可能な体験手法について

#### 1) 何度も体験してもらうためのコンテンツの工夫

現実の砂場のような遊び方をする体験者も多く見られた。砂をかき集めたり、ばらばら砂を落としたり、砂場で見立て遊びをするように川や山や道をつくったり、友達と協力して全部の砂を

寄せ集めたり，ものを置いて物語を語ったり，仕掛けのある装置としてではなくただ砂との戯れを楽しんでいる光景も見られた．無心に遊べる砂遊びと同様な癒しの場を提供した．提案者が全ての演出をするのではなく，参加者の工夫の余地を残した点が持続可能な体験のヒントになると考える．

砂の触り方は，温冷呈示ディスプレイ時は，ディスプレイ面に手をじっと置いていたり，横滑りさせる程度だったが，砂状硬軟ディスプレイ時は，もっとアクティブにかき集める行為が多く見られた．

## 2) 知的好奇心を刺激する工夫

体験者が何か仕掛けがあることに自然と気がつき，この部分は砂が硬くなるとかどうすれば硬くなるか砂に隠れていた装置の仕組みを発見し，気づいたことに喜び，友達に教える．友達を呼んで，一緒に体験しようと誘う．宝探しをするように，反応している電磁石を探しスチールボールでできた砂をくっつけ実験し，自分で遊び方を考え工夫する体験の様子をよく見かけた．これは，磁石遊びは低学年の理科でも体験するが，科学遊びと表現が一緒になって知的好奇心を刺激しているように思われた．

## 3) 公共の展示物としての安全性配慮したアクセシブルなインタフェース

公共の場において，老若男女に体験してもらう配慮として，安全に体験してもらう工夫がある．本章での電磁石を使用したディスプレイでは，ペースメーカーや時計を装着したままの体験者には注意が必要だった．ディスプレイ面の高さなどに躯体に対しては安全性に配慮したが，デバイスそのものについて剪定の工夫が必要に思われた．また，スチールボールを直接触ることで，周期的にスチールボールの洗浄が必要だった．金属アレルギーの体験者にはあらかじめ周知が必要であった．事前の情報の開示をすることで，安全な展示が可能になると考える．

## 4) 展示品としての耐久性

メディアのハードウェアやソフトウェアに依存することの多いインタラクティブメディア作品が抱える課題の一つとして作品の寿命がある．体験者の頻繁な使用に対し，安全に長期の展示に耐えうるか．年代を経た作品を再現可能であるか技術的にも躯体設計にも課題がある．本章で開発したディスプレイは，科学館での2年間以上の常設に耐えているので，設計上は問題がなかったが，消費電力が大きいという点は今後の課題である．

## 5) 電磁石ディスプレイとしての発展性

今回は，微小スチールボールをディスプレイ面に敷き，砂場のような場を提供したが，電磁石を使用したディスプレイとして考えた場合，電磁石の特性を生かした遊びも考えられる．例えば，電磁石によってスイッチがON,OFFになるデバイスを組み込んだ玩具や電磁石によって動く形状記憶素材など，さらさら感，ずっしり感の砂場以外の感覚を呈示できるディスプレイにもなると考える．ワークショップを通じディスプレイを磁気発信源と考え振動呈示をおこなう小型デバイスの実装することができた．このことから，電磁石を使用した触覚呈示デバイスを使用



し小型の振動触覚呈示への応用ができることを示すことができた。

## 6) ワークショップによる参加性の向上と触覚体験

この電磁石ディスプレイを使用した、電子工作のワークショップでは、参加者自らがこのディスプレイ上で光ったり、振動したり、動いたりするものをアクティブに制作することによって、電子工作体験を通じ自分だけの触覚玩具が実装でき、それを使用して遊ぶことにより触覚体験が身近に感じた行動が観察できた。このようなワークショップ体験は、日常の触覚体験を気がつかせ、触覚体験を積むことによって2.4.4であげたブルーノムナールの言う「触わって感じる力」を養うのではないかと考える。

## 5.7 結論

技術選定理由に基づき、砂状硬軟感覚呈示ディスプレイの設計と実装をおこなった結果、実演展示を行動観察とヒアリングから、楽しさを提供する砂状硬軟呈示ディスプレイの選定理由に基づいた設計意図や画像と触覚呈示の連動方法の工夫が体験者に伝わり砂状硬軟感覚呈示ディスプレイが視覚効果だけでなく触ることによって体験できる新しいメディア表現を図り、インタラクティブな触覚呈示可能な技術とその技術を利用した表現の新規性を認めることができた。砂状の硬軟感では電磁石に引き寄せられるスチールボールとバネのシミュレーションの相乗効果で吸い付くような重みのある砂の感触が新しい体験として提示され、砂遊びの新しい楽しみ方を提案することができた。視覚と触覚を共有できる砂状の硬軟ディスプレイを使用すると参加者同士の会話が多くなりその光景に触発され積極的に参加する観客が多く見られた。その結果、素材を変えることで共有できる触覚呈示ディスプレイの参加性の増加の効果があることがわかった。以上のことから温冷呈示では個々の人間の部位と触る面のダイレクトな感覚のため、遠目からどのような触感を感じているのかを共有することが難しい点があったが、砂状の素材を使用した硬軟感覚ディスプレイは砂場のような遊びが観察され参加性に優れていることがわかった、インタラクティブこれまでの遊びをベースに機能を付加したり、その場で、自ら発見したり、作る楽しさを提供することで、コミュニケーションの場の創出に役に立った。ディスプレイに則したコンテンツの工夫によって可動機構と画像が連動する。触覚呈示が加わることで視覚だけでは得られない楽しさや感覚統合による刺激や新しい表現の相乗効果が得られることが参加者の観察とヒアリングから得られた。さらに、参加者が触体験を共有できるワークショップを開催したことで、触覚体験を共有する意識を促進し、記憶に残る触覚体験を提供した。電磁石を使用したディスプレイを磁力源とする二次的な使用方法を提案し、手に中に収まるパーソナルな触覚呈示ができるデバイスを個々が制作できるワークショップ体験は、日常の触覚体験を気がつかせ、触覚体験の学習や「触わって感じる力」を養いことで、触覚体験が日常生活へのさらなる発展性を見ることができた。

以上のことから、本制作は、インタラクティブな砂状硬軟感覚呈示ディスプレイに技術的な新規性があり、それを使用した新しい砂場のような表現にこれまでなかったメディア表現の創出が見られ、その工学と素材、表現やワークショップでの体験をあわせた創出方法にメディア表現を拡

張する効果があるという結論が得られた.



## 第 6 章

# 毛状生物感覚呈示ディスプレイによる表現の拡張

### はじめに

本研究では、表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した生物感覚を想起させる毛状呈示を視覚と同一箇所に表示を感受することができるディスプレイ装置を開発した。生物感覚呈示ディスプレイの制作にあたり、素材の検討や制御方法を検討し、その結果をもとに大型ディスプレイを制作し、その制作物の展示をおこなった。さらにディスプレイの検証をおこなった。ここでは、毛状生物感覚呈示ディスプレイの制作とそのディスプレイを使用した表現の拡張について述べる。

### 6.1 毛状生物感覚呈示ディスプレイの制作

実空間でのコミュニケーションにおいて、障がい者と健常者が、また子供から老人まで楽しみを共有できる場は少ない。本研究は、障がい者と健常者が楽しみを共有できる場の構築を目的とし、生物感覚を提示できるインタラクションのある視触覚ディスプレイの開発とコンテンツの提案をする。

動物を触ることで、人は楽しみや安らぎを得る。生きた動物の場合、触れた部位の皮膚が局所的に縮んだり、伸びたり、あるいはよじれたりして、毛が短くなり、長くなり、あるいは左右に回転するために、触れた時に生物感が生じると考えた。そこで、ディスプレイ自体の表面に植えた毛を長くしたり、短くしたり、左右に回転させる方法を試みた。本作品では、楽しみを共有する為の表現のために自然毛を使用し、触ることでインタラクティブにディスプレイ表面の素材そのものが凹凸、回転する機構を備えたディスプレイを新しく開発した[133,134]。

美術における毛状の素材を使用した関連作品として、メレット・オッペンハイムの「オブジェ」[135]やレベッカ・ホルンの「ダンス・パートナー」[136]では、毛の感覚的な記憶や刺激を作品に生かすという点において本作品と共通している。モーターなどの機械装置を使用した生物化の点では、ティンゲリー[137]やナム・ジュン・パイクの「ロボットK-456」[138]や河川洋一郎の[139]など機械的な動きが斬新な生命感を持つ作品はいくつかあるが、毛自身をインタラクティブに動かして生物感を出そうとしたものは見あたらない。

モーターを使用した触覚ディスプレイとして、岩田らによる FEELEX[48]はモーターの回転運動を直線運動に変化することによってアクチュエータを上下に動かす可変式のディスプレイである。ディスプレイの上にはゴム製のスクリーンを配置し動く生物の映像を投影している。Leithinger らによる Relief[140] や Matthew らによる Recompose[141]ではモーターフェーダを垂直に使う事

で 3D 的な形状変化が可能なディスプレイを開発した。またこれらは手の動きをセンシングしアクチュエータを上下動させ形状変化させることができる。形状記憶合金を使用したディスプレイとして、Poupyrev らによる Lumen[142]、中谷らによる Popup![143]らがあげられる。これらは電流が流れる事により収縮し可動部を持ち上げる事によって情報提示する。形状記憶合金の特徴として駆動音はほとんどなく、ある程度上下動の幅も操作できる。

毛状のインタフェース技術として、I/O Brush [144]、Fibratus tactile sensor[145]や天然の毛に振動を与えて立毛現象を生じさせる毛ディスプレイ[146]や光ファイバーを用いた毛状ディスプレイ[147]などがあるが、本研究の「Fur-Fly」は、自然毛の上下、回転する生物的な動きのアクチュエータを用いて直接手で触れることができ、触ることによって、映像と同時に触覚のインタラクションがあることが異なる。これまでになかった回転する動きを加えることで、より生物感のある複雑な動きを表現している。

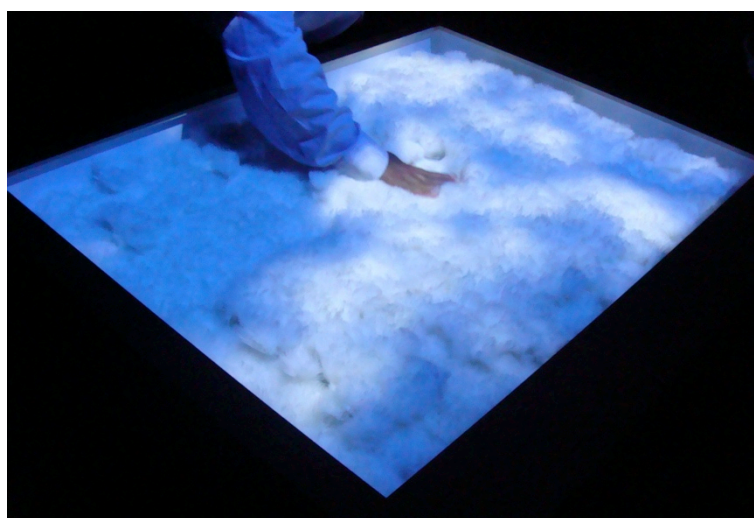


図6.1 Fur-Fly ディスプレイ

図 6.1 のようなディスプレイを使用したインタラクティブ作品「Fur-Fly」は、動物の形の生成や雲のシミュレーションや国旗をディスプレイ上に投影した映像に加えて生物のような動きが同期して体験者に新しい触視体験の場を提供することができた。本論文では、視触覚ディスプレイの技術と作品「Fur-Fly」における、基本概念と制作課程及び実装展示の考察をおこなう。

## 6.1.1 50 インチ毛状生物呈示ディスプレイのシステム構成

### 6.1.1.1 構造

本研究の視触覚感覚呈示ディスプレイの開発にあたり、インタラクティブな視覚の切り替えが可能でありかつインタラクティブな触覚感覚が呈示でき、画面を触ったところの視覚と触覚呈示が対応していることを4,5,6章の共通要件としている。それぞれのディスプレイで触覚呈示する素

材により使用する機構を変えている．本章では生物感覚を呈示するために毛状素材とサーボモーターを使用したディスプレイを開発した．

テーブル状ディスプレイの上部に毛を敷き詰めた図6.2のような20cm の深さのあるオリジナルな50 インチディスプレイを制作した．開発に当たっては，[148,149]の経緯がある．画面縁に設置された光学式タッチパネル（E I T社XYFer）で接触位置を検出し，位置情報がCG 画像生成と凹凸回転アクチュエータの機械制御に同時に送信されることによって，画像と触覚の連動したインタラクションを実現させている．

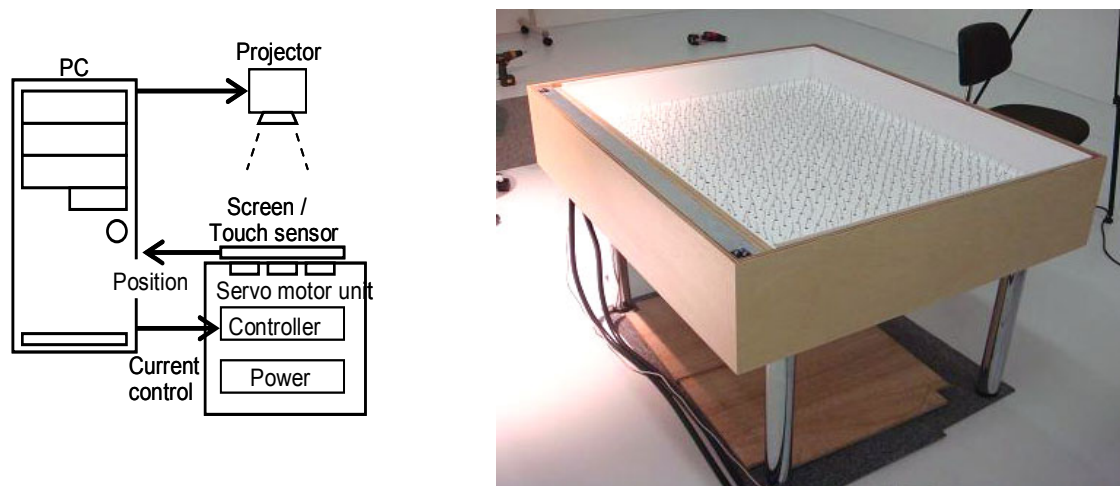


図 6.2 システム構成

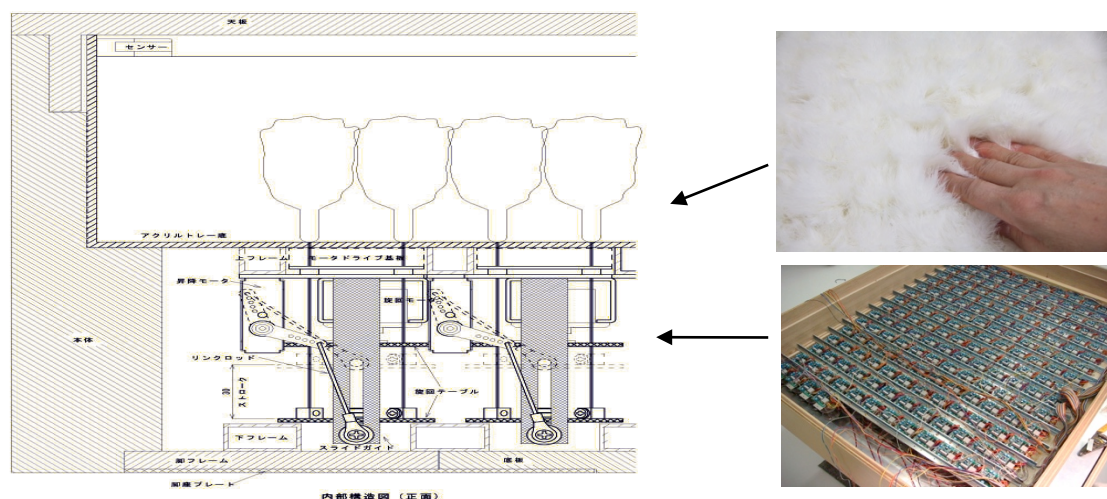


図 6.3 内部構成

50インチディスプレイに縦12ユニット横16ユニット合計192ユニットを隙間なく配置し，図6-3のようにユニット上部の768本のピンに根元を1本にしたウサギの毛を束上にまとめたものを4cm等間隔になるよう植えつけ敷き詰めた．下部機構部分と，毛の間に埃防止のための白アクリルを挟み，部品交換が可能なように，各ユニットは単独で取り外しができるよう配慮された．192

のユニットは、1個1個、個別に制御することができる、コンピュータソフトとディスプレイの感触に対応した高速CGシミュレーションを開発した。

#### 6.1.1.2 ユニット

毛を植えつけられている生物感覚発生アクチュエータ部分は、図6.4のように上下30mm、60度回転するよう設計されている。これまで、ソレノイドやエアーによる上下の凹凸による触覚ディスプレイ[150,151]はあったが、回転運動を加えた触覚ディスプレイはなかった。それにより、より複雑な運動刺激を得ることができるディスプレイの開発に成功した。

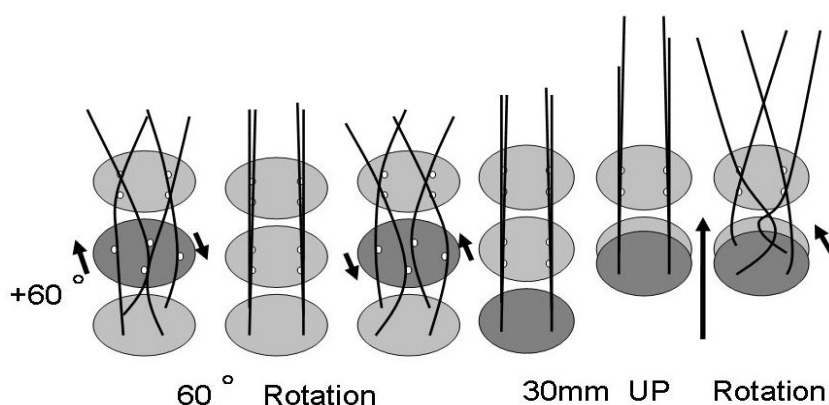


図 6.4 ユニット構造の概念図

上下するための機構として図6.5、6.6のように、三層のプレートの二層部に回転用と上下用のサーボモータを各1個ずつ配置している。上下三層をワイヤーで連結することで、上下、回転運動を少ないモーター数と制御回路でスムーズに連動させている。また、しなやかなワイヤーを使用することで、自然な回転角度と動きと共に毛の軸が手に刺さることがないように安全性にも配慮されている。

1ユニットに4本を植毛し、植え付け部分は、毛の取り外しができるような金具が装着され、よごれによる取り替えや毛以外の素材の植え替えができるように考えられている。

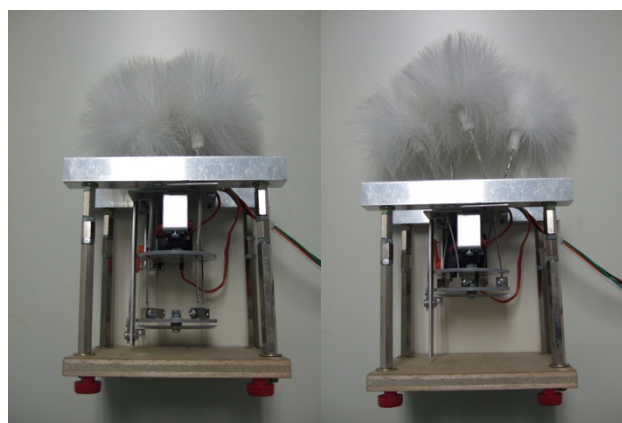
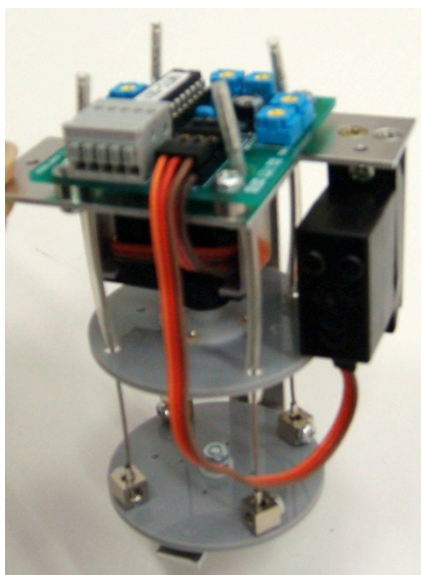
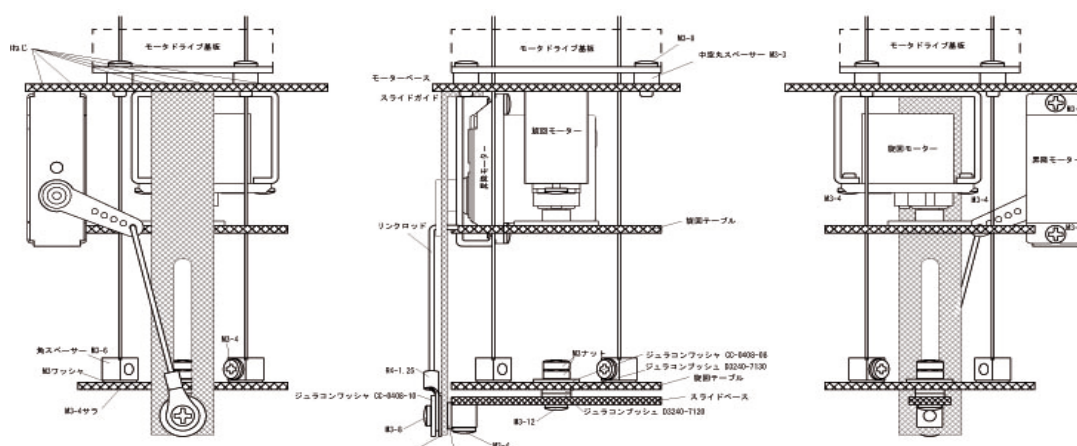


図 6.5 ユニットのシステム構成



### 6.1.2 画像生成

画像生成部は、タッチパネルからの位置情報に連動して画像がリアルタイムで生成し、生成された映像をプロジェクターによって上部からテーブル面に向けて投影する。画像生成にはC言語、OpenGLを使用し、雲や動物の形にメタボールの技術を使用し、触覚の感覚に連動した3次元でのリアルタイムの映像を提供している。

今回のプログラムでのメタボールの生成法は、**XZ** 平面上に予め設定されている影響半径、中心位置と中心濃度から、濃度分布を計算し、同じく **XZ** 平面上にマトリック状に並べたポリゴンメッシュの頂点をその位置に対応した濃度分、**Y**+方向に持ち上げることで、濃度分布を形状化している。さらに、**OpenGL** のクリッピング機能を利用して、濃度 **W** の高い部分だけを表示することによって、2次元メタボールの表示を行っている。濃度 **W**は、次のように表される。



$$W = \{\cos (d / \pi R) 0.5 + 0.5\} ws$$

$d$  中心位置とメッシュの頂点との距離

$R$  影響半径

$ws$  中心濃度

メタボールを高速に表示するための工夫として、メッシュの頂点位置、つまりその位置での濃度を計算する際、予め、空間分割法を利用して、頂点付近のメタボールだけを見付だし、そのメタボール情報のみで計算することで高速化を図っている。さらに、メタボール同士は互いに影響しあうようになっており、各メタボールの半径内に入ったメタボールの濃度を加算することによって、メタボール同士がくっついたり、離れたりするようになっている。このメタボールにテクスチャを張ることによって、雲を表現している。このメタボールに以下のようなテクスチャを張ることによって、図 6.7 のように雲を表現している。

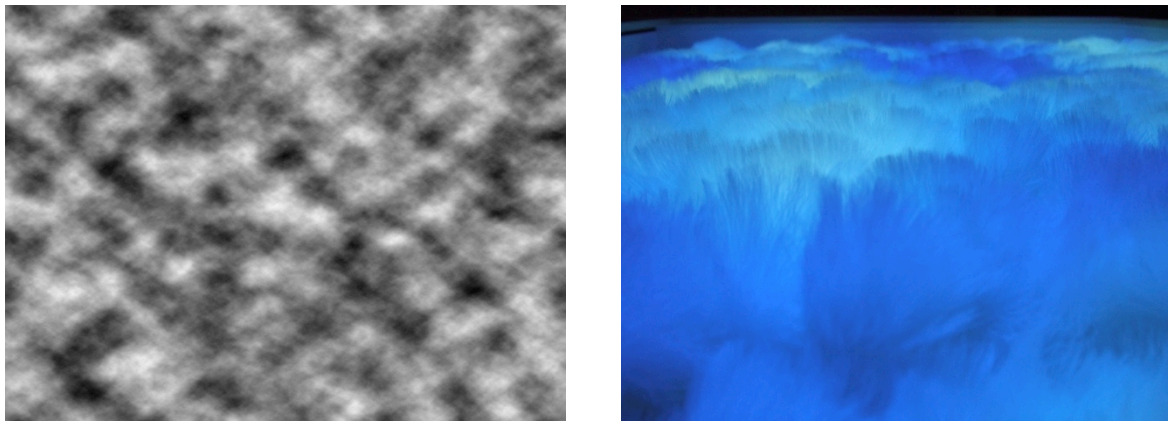


図 6.7 雲バージョンのCG画像と投影画像

動物バージョンは、マトリックス状に並べたポリゴンパッチ上に予め配置されているメタボールをランダムなタイミングで上下方向に動かすことによって、図 6.8 のようにランダムな形から具体的な動物の表現へ変化するよう計算されている。

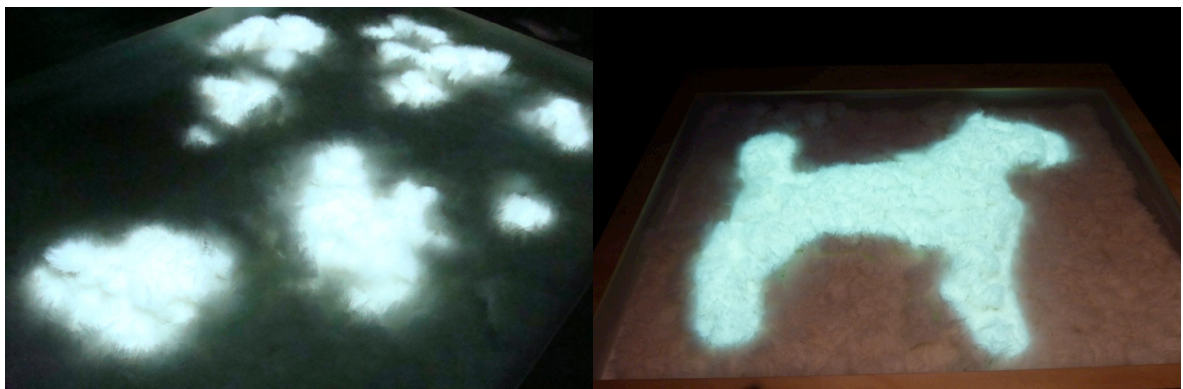


図 6.8 動物バージョンの投影映像

### 6.1.3 表現

映像と駆動部分の特性をいかに融合させてコンテンツを提供するかが、表現の重要なポイントとなる。

雲バージョンは、白い雲の映像時に、アクチュエータが凸状態になるようプログラミングしている。雲の視覚的な効果と立体感のあるふわふわした感触を一致させることで、雲のイメージを増幅させている。

動物バージョンは、白い映像の部分と凸で回転するアクチュエータの状態を一致させ提示した。小さな細胞のような白い塊が回転の動きに連動し、毛状の先端を接触時に回転した動きの抵抗感が生物感を一層増幅させる様な演出をしている。画像と駆動部分の動きの違いを出しかつ体験者を飽きさせないために3種類のコンテンツが2分おきに自動的に変わるようにプログラムされた。

### 6.1.4 毛状生物感覚呈示ディスプレイの考察

本システムはACM SIGGRAPH 2009 Art Gallery [133,149]及びASIAGRAPH2009[152]において実演展示を行い、国内外の2000人以上の体験者を得た。

日本科学未来館で開催されたASIAGRAPH2009において、表6.1のように、100名の観客の行動を年齢、体験時間をビデオにより観察した。土曜日13:00-13:15の15分間に100名の体験者が来場し、観客平均体験時間 28:38秒 2歳から60歳代の観客が常に3.3名の体験者がディスプレイを触る状況であった。19歳以下の子供、青少年の平均体験時間は、51:13秒で、平均体験時間の2倍あった。図6.9.aのようにディスプレイが視野に入った観客は、ほぼディスプレイ毛部分を触り、今後の応用分野として広告映像の誘導装置としての可能性があるように思えた。

表6.1 来場者の年齢と接触時間(100名15分間)

年齢	人数	平均接触時間
0-19	17	51 秒 13
20-29	37	28 秒 13
30-39	37	21 秒 02
40-	9	28 秒 47

体験者の意見として、動物は怖くて触れないが、このディスプレイは触ることができ、色が変わったり、雲が流れたりしてキレイだった、癒されると言う意見があり、動物に変わるセラピーとしての効果があると考えた。

サーボモータの駆動音が、生き物の鳴き声に聞こえ、機械ではあるが生物的だという意見も多く聞けた。飼っていた猫を想いだすなど、柔らかい毛を触ることで触覚記憶を呼びさますなど、触覚と視覚の同時の刺激によって今までにない新しい視触覚ディスプレイの体験を提供できた。



また、図6.9.b のように2012年10月企業で玩具の評価を行い、かつ全盲の障がいのある体験者による個人のヒアリングをおこなった。音がひよこの鳴き声みたいで、触っていると生きているように感じる。電子音ではなく、生の駆動機構の音と凹凸がリンクしていることが安心できる。色々な角度の毛先があって自然でいい。機械で動いていることを忘れそうになるほど気持ちよくて癒され、愛情を感じてくる。という意見があり、全盲者にとっても健常者と同様に生物感を感じたとの意見を得ることが出来た。

楽しみを共有できるという点では本研究が障がい者にとっても有効であると考えられるが、触覚研究においての有効性は今後更なる生体的データを取得し人間工学的な検証が必要である。

今後の改善点としては、インタラクションの為のタッチセンサーに多点方式を採用し、多人数に対応したい。また、強く抑えると毛先が曲がり、回転運動を妨げることがあり、毛の軸の素材の検討が必要であるとする。



a: ASIAGRAPH2010



b: 全盲者の実験

図6.9 実装展示

## 6.2 生物感覚呈示の定量化実験

### 6.2.1 定量化実験の概要

デジタルサイネージ（電子看板）とは、表示と通信にデジタル技術を活用して平面ディスプレイなどによって映像や情報を表示する広告媒体である。従来技術である視覚のディスプレイに対し、本技術では、表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した触覚表示を視覚と同一箇所に表現を感受することができるディスプレイ装置を提供できる。今回の実験では、開発した視触覚ディスプレイ装置による体験で観客がどのような身体の変化があり、感性評価をもったのかのデータを収集した。特に視線計測や生体情報、アンケートによる特徴など人間工学的なデータ収集することで、デジタルサイネージなどの実社会へ向けた実用化の検討を図った。

### 6.2.2 デジタルサイネージとして有効であるかどうかのデータ収集

- ・視線計測，注目時間，体験時間に有効性がみられるかのデータ収集。
- ・生体計測による，身体に及ぼす影響のデータ収集

視触覚ディスプレイによる心身への影響を視線軌跡，心拍数，唾液アミラーゼ活性，感性評価によりの検証を実施した。実施計画書記載の②生体計測等については，この章でデータの収集をした。当初予定していた広告企業などへヒアリング調査に関しては，今回開発した提示画像の書き換えが簡単にできるソフトウェアの技術開発後，改めて調査することとした。

#### 6.2.2.1 実験目的

従来の視覚のみあるいは触覚のみで表現するディスプレイでは，障がい者と健常者の両者が同時に楽しみを共有することが十分とはいえなかった。筆者らは，この問題を解決する楽しみを共有できる場の構築を目的とした触覚インタラクションのある視触覚ディスプレイが開発してきた。本実験では，この視触覚ディスプレイによる人間の心身への影響を人間工学的手法により調べることを目的とする。また，触覚情報を呈示することによる触るという行為への誘発性についても検討する。

#### 6.2.2.2 実験方法

視触覚ディスプレイによる心身への影響を視線軌跡，心拍数，唾液アミラーゼ活性，感性評価により調べた。実験条件として触覚の有無の2つの条件を体験することにより，触覚の効果を検証した。

#### 6.2.2.3 実験使用対象

筆者らにより開発された視触覚ディスプレイ（図 6.10）を用いた。これは，毛を使用した凹凸ディスプレイ（作品名 Far Fly）であり，上下に回転を加えた動きを持ち，少ないモーター数で複雑な動きを表現できるものである。



図 6.10 視触覚ディスプレイ

視触覚ディスプレイに呈示される映像としての視覚刺激としては，“Far Fly”による動物・雲・国旗とし，触覚刺激は，視覚刺激に合わせた“Far Fly”による毛を使用した凹凸運動である．

#### 6.2.2.4 実験条件

実験条件は次の 2 条件とした． 1 条件の呈示時間は，3 分 30 秒程度であった．

- ・条件①：視触覚ディスプレイを視覚のみで体験する．
- ・条件②：視触覚ディスプレイを触覚と視覚の両感覚により体験する．

#### 6.2.2.5 実験参加者

実験参加者は，視覚，色覚，触覚に異常がなく，健康であることとした． また，実験に協力的であった． 実験参加者数は，11 名（平均年齢 22.5 歳±標準偏差 0.82 歳，実験参加者 A～K）であった． 内訳は，男性 6 名，女性 5 名であった．

#### 6.2.2.6 測定指標

測定指標は，視線軌跡，心拍数，唾液アミラーゼ活性，感性評価とした． また，実験参加者情報を得るためのアンケートおよび体験に対するインタビューを行った．

#### 6.2.2.7 測定機器

測定機器は，以下の通りであった．

- ・アイマークレコーダ（視線軌跡記録装置）：EMR9，nac イメージテクノロジー
- ・心拍測定計：SUUNTO t6d，SUUNTO
- ・唾液アミラーゼ活性測定装置：唾液アミラーゼモニタ，ニプロ
- ・実験状況記録：ビデオカメラ

### 6.2.3 感性評価アンケートおよびインタビュー

アンケートにより調査した項目は，性別，年齢，体調，緊張の具合，視触覚ディスプレイの体験の有無，22 項目の感性評価とした． 感性評価項目は，表 6.2 の通りである． 評価は，体験した

条件に対して 7 段階尺度により評定してもらった。

インタビュー内容としては、まずは自由に実験参加者に感想を述べてもらい、その中で視覚だけの時に触りたくなかったかどうか、視覚だけと触覚が加わった条件での違いがあったかやどんなところが好きかなどについて述べてもらった。

表 6.2 感性評価項目

1	楽しいーつまらない	12	繊細なー雑な
2	近づきたいー遠ざかりたい	13	珍しいー珍しくない
3	明瞭なー不明瞭な	14	心地よいー心地悪い
4	快適なー不快な	15	好きなー嫌いな
5	癒されるー癒されない	16	シンプルなーシンプルでない
6	やさしいーやさしくない	17	飽きのこないー飽きのくる
7	積極的なー消極的な	18	わかりやすいーわかりにくい
8	ほっとするーほっとしない	19	魅力的なー魅力的でない
9	温かみのあるー温かみのない	20	ワクワクするーワクワクしない
10	満足するー満足しない	21	触れたいー触れたくない
11	安心するー不安な	22	触れていたいー触れていたくない

### 6.2.3.1 実験手順

実験手順は以下の通りであった。

1. 実験者は、実験参加者に実験説明書により説明を行い、同意書に記入もらう
2. 条件①または条件②の準備
3. 実験参加者は、アンケートに記入する
4. 実験参加者は、唾液アミラーゼ活性を測定するため、口を 1 回すすぐ
5. 実験者は、実験参加者に心拍測定計、アイマークレコーダを装着する
6. アイマークレコーダとビデオの記録を開始する
7. 実験参加者の唾液アミラーゼ活性を測定する
8. 実験参加者の立位状態の心拍数を 1 分間計測する
9. デジタルサイネージを準備する
10. 実験開始  
(ア) 心拍数のスタートボタンを押す  
(イ) アイマークレコーダにマーク
11. 実験終了
12. 実験参加者の唾液アミラーゼ活性を測定する
13. 実験参加者の立位状態の心拍数を 1 分間計測する
14. 実験参加者は感性評価アンケートに記入する
15. 7～14 を 2 条件で繰り返す。2 条件終了後、心拍測定計、アイマークレコーダを外す
16. 視触覚ディスプレイの体験に対してインタビューを行う

### 6.2.4 実験結果

測定した指標である視線軌跡、心拍数、唾液アミラーゼ活性、感性評価、インタビューそれぞれ

れにおける結果を示す.

#### 6.2.4.1 視線軌跡

2 条件それぞれの視線軌跡の結果のうち, 特徴的な結果を図 6.11,6.12,6.13,6.14 に示す. 背景にある画像は, ディスプレイの位置を示すためのものであり, 実験中は動画である.

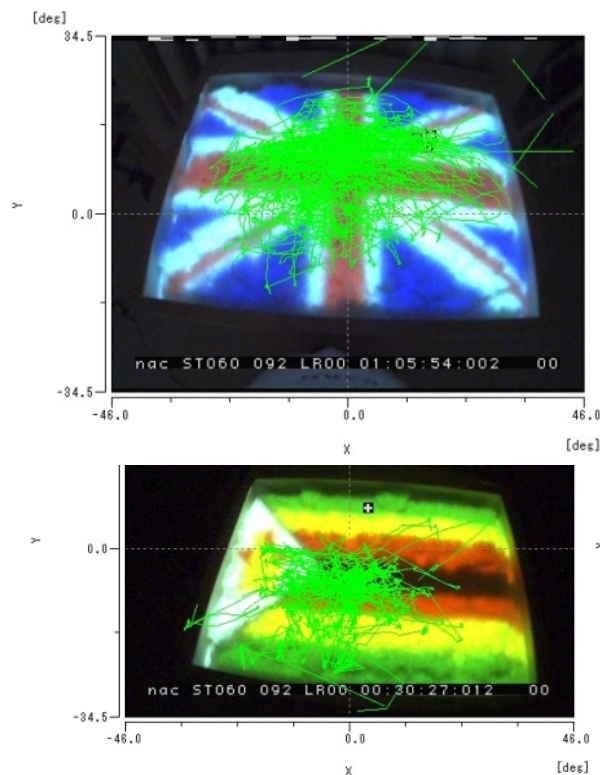


図 6.11 実験参加者 A の条件①

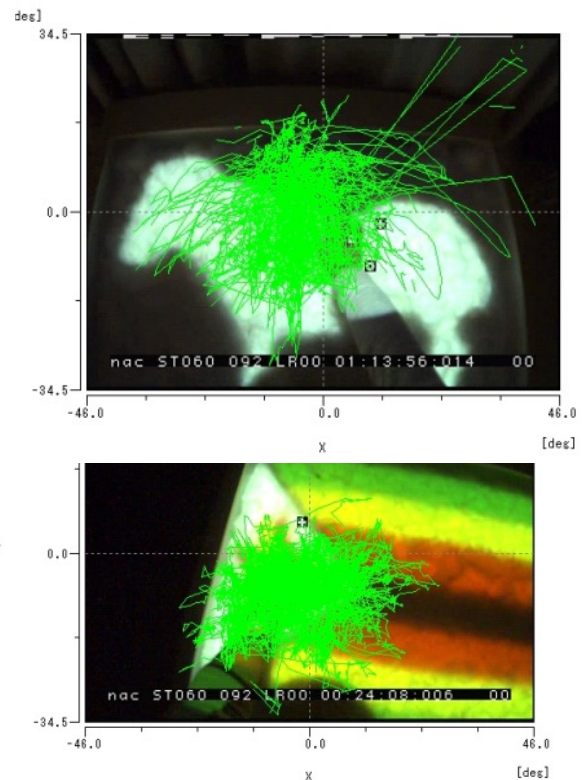


図 6.12 実験参加者の A の条件②

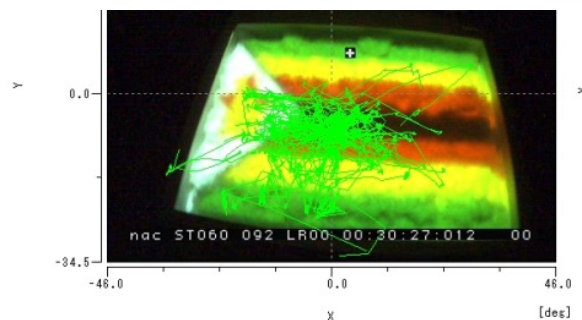


図 6.13 実験参加者 J の条件①

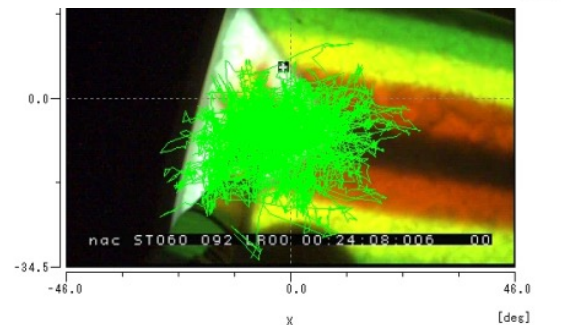


図 6.14 実験参加者の J の条件②

#### 6.2.4.2 心拍数

心拍数測定計により 6 名分のデータが測定された. 5 名については原因は特定できなかったが, 装着不備により測定できなかった. 1 回目の実験開始前の立位安静 1 分間の心拍数, 条件①の実験中の心拍数, 条件間の立位安静 1 分間の心拍数, 条件②の実験中の心拍数, 2 回目の実験終了後の立位安静 1 分間の心拍数の平均値と標準偏差を図 6.15 に示す.

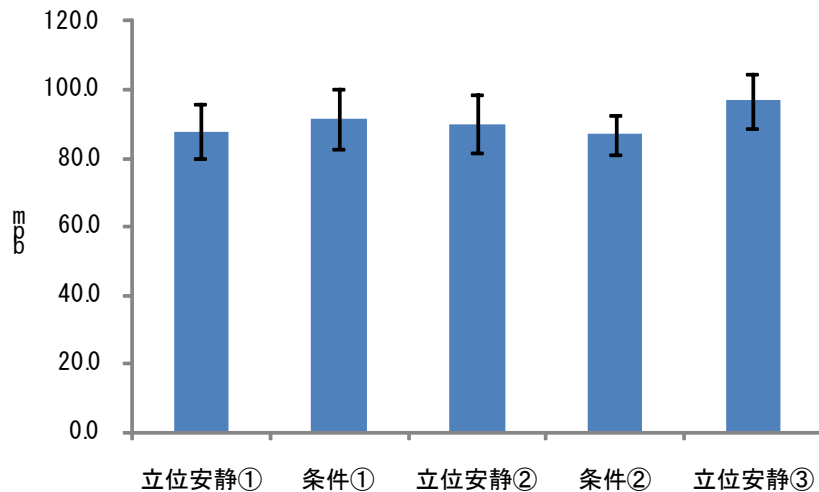


図 6.15 心拍数

心拍数において各条件間に差があるかどうかを調べるために一元配置の分散分析を行った。その結果、条件間には有意な差が認められなかった ( $F(4,22)=1.163$ , n.s.)。

#### 6.2.4.3 唾液アミラーゼ活性

唾液アミラーゼ活性について、実験開始前と各条件後の平均値を図 6.16 に示す。各条件間に違いがあるかを検討するために、条件を要因とする一元配置分散分析を行った。その結果、条件②が条件の中で最も高い値であったが、どの条件間にも有意な差は認められなかった ( $F(2,27)=1.033$ , n.s.)。

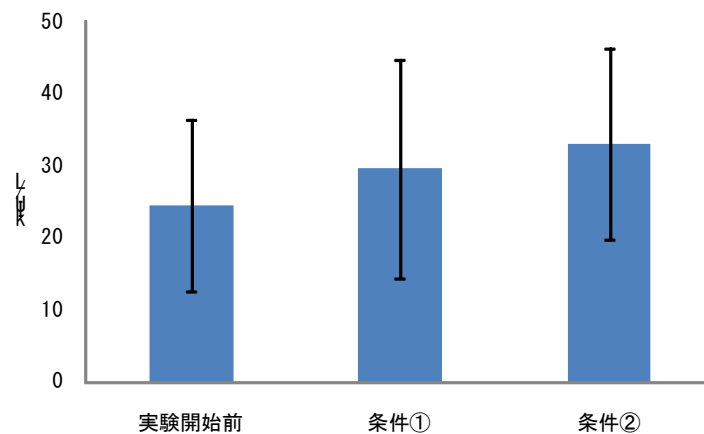


図 6.16 唾液アミラーゼ活性

#### 6.2.4.4 感性評価

感性評価 22 項目の各項目の平均を図 6.17 に示す。項目番号 1～11, 14～16, 19～22 は条件②の方が条件①よりも評価が高かった。

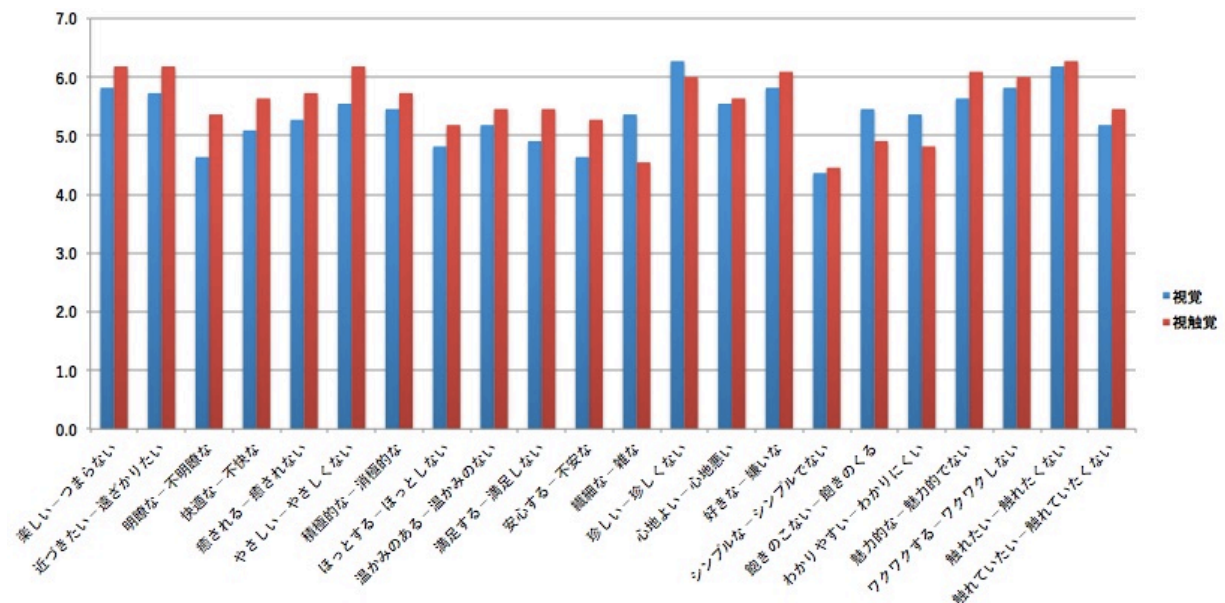


図 6.17 感性評価項目

表 6.2 感性評価項目

1	楽しい—つまらない	12	繊細な—雑な
2	近づきたい—遠ざかりたい	13	珍しい—珍しくない
3	明瞭な—不明瞭な	14	心地よい—心地悪い
4	快適な—不快な	15	好きな—嫌いな
5	癒される—癒されない	16	シンプルな—シンプルでない
6	やさしい—やさしくない	17	飽きのこない—飽きのくる
7	積極的な—消極的な	18	わかりやすい—わかりにくい
8	ほっとする—ほっとしない	19	魅力的な—魅力的でない
9	温かみのある—温かみのない	20	ワクワクする—ワクワクしない
10	満足する—満足しない	21	触れたい—触れたくない
11	安心する—不安な	22	触れていたい—触れていたくない

条件間において統計的に検討した結果、いずれの項目においても条件間に有意な差があることは認められなかった。そこで、条件間の相関関係を調べたところ、以下の項目において有意な相関関係が認められた (表 6.3)。



表 6.3 有意な相関関係が認められた項目

項目	相関係数	有意確率 p
3. 明瞭さ	0.687	0.019
7. 積極的	0.613	0.045
8. ほっとする	0.725	0.012
9. 温かみのある	0.858	0.001
14. 心地よさ	0.873	p<0.001
16. シンプルさ	0.871	p<0.001
22. 触れていたい	0.654	0.029

視覚のみの「21. 触れたいー触れたくない」とその他の相関関係を調べたところ、以下の項目において有意な相関関係が認められた（表 6.4）.

表 6.4 視覚のみ「21. 触れたいー触れたくない」有意な相関関係が認められた項目

項目	相関係数	有意確率 p
1. 楽しい	0.854	p<0.001
2. 近づきたい	0.923	p<0.001
6. やさしい	0.735	0.009
10. 満足する	0.674	0.016
12. 繊細な	0.833	p<0.001
14. 心地よさ	0.837	p<0.001
15. 好きな	0.903	p<0.001
20. ワクワクする	0.786	p<0.001
22. 触れていたい	0.825	p<0.001

視覚+触覚の「21. 触れたいー触れたくない」とその他の相関関係を調べたところ、以下の項目において有意な相関関係が認められた（表 6.5）.

表 6.5 視覚+触覚「21. 触れたいー触れたくない」有意な相関関係が認められた項目

項目	相関係数	有意確率 p
1. 楽しい	0.889	p<0.001
2. 近づきたい	0.921	p<0.001
6. やさしい	0.922	p<0.001
10. 満足する	0.903	p<0.001
12. 繊細な	0.567	n.s.
14. 心地よさ	0.843	p<0.001
15. 好きな	0.934	p<0.001
20. ワクワクする	0.952	p<0.001
22. 触れていたい	0.834	p<0.001

#### 6.2.4.5 インタビュー

実験終了後に行ったインタビューの結果、実験参加者 11 名中 2 名を除いて、触りたいという欲求に関するコメントを述べていた。また、楽しさを表現した実験参加者は 7 名おり、4 名については癒しやリラックスを感じており、6 名は生き物のイメージを抱き、実際に動物の形が呈示されたときに触りたいと思ったり実際に触る行動をとっていた。1 名からは、無機質で人工的な印象を持っているが、予測不可能な動きをすることが面白いというコメントを得た。

#### 6.2.5 生物感覚呈示ディスプレイ定量化実験の考察

本実験では、視触覚ディスプレイを用いて、人間の心身への影響を視線軌跡、心拍数、唾液アミラーゼ活性、感性評価により調べた。また、触覚情報を呈示することによる触るという行為への誘発性についても検討した。

視線軌跡分析に結果から、条件①の視覚のみの実験では映像情報を追従し、条件②の触覚を加えた実験より若干視線移動が広くなることが認められた。条件②の触覚を加えた実験では、映像情報に加えて毛の凹凸運動を触るという行動に影響され、視線移動が少なくなる傾向があった。伝えたい情報を映像と動きの両方で呈示することにより確実にユーザ側に伝えることができることが示唆された。

心拍数と唾液アミラーゼ活性の結果からは、安静時と実験時での差異が認められなかったことから、触覚を加えた情報を呈示してもストレスに感じることはなく、生体への負の影響はないことが示された。安静時と同様であることから視触覚ディスプレイは、安静時と同様である要因を提供できる可能性が認められた。

感性評価の結果から、条件①と条件②の間に違いは認められなかったが、触覚を加えた条件②の方が、楽しさややさしさという印象を与えられる。また、今回用いた視触覚ディスプレイは、触覚という情報を用いない、視覚のみで情報を呈示した場合においても、明瞭さ、ほっとする温かみを提供でき、触れていたいという感情を誘発することができた。このことは、毛という温かみのある要素とその動きが影響していることが考えられる。つまり、視触覚ディスプレイにどのような情報を提供するかににより素材を選定することによって、有用な情報を提供することができるといえた。

視覚のみの場合と視覚+触覚の「21. 触れたいー触れたくない」とその他の相関関係を調べたところ、楽しい、近づきたい、心地よさ、好きな、ワクワクする、触れていたいという感情を視覚のみ、視覚+触覚共通に誘発することができた。これは触れたいという感情と楽しい、心地よさ、ワクワクするという感情が結びついて近寄って触りたい感情を誘発する効果が視触覚ディスプレイにはあると考える。満足するという感情が、視覚のみより触ることが加わることでより増すのは、触ることによって充実した体験を得ることができたことが考えられる。繊細なという感情に対しては、触れることよりも、毛の繊細な素材に画像が投影されより注視できることで視覚のみの方が優位であったと思われる。

インタビュー結果からも、視触覚ディスプレイは触れていない場合には触れたいという能動的な行為を誘発することができ、実際に触れた場合には触れていたい感情やリラックス効果があることが認められた。

以上のことから、本実験で用いた視触覚ディスプレイは、身体への負の影響は認められず、安静時と同様の効果を提供でき、また、触れたい、触れていたいという能動的な行為を誘発することが可能であることが示された。

### 6.3 結論

第6章では、従来技術である視覚のディスプレイに対し、これまで表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した毛状の凹凸ディバイスを視覚と同一箇所に表現を感受することができるディスプレイ装置を開発し、まず、そのシステムの概要や仕様、実装方法を示し技術選定理由に基づき、毛状生物感覚呈示ディスプレイの設計と実装をおこなった。またそのディスプレイを使用した表現作品を制作し、発表をした。作品展示での参加者の観察と行動、ヒアリングから楽しい、生き物みたいで可愛い、飼っていた猫を思い出すなど情動に訴えるような意図した表現が伝わっていることを確認した。より積極的に触りたくなる素材によって異なった触覚感覚の体験が得られるのではないかと考え、生物的な感覚を得るため毛の素材を使用しディスプレイを制作した結果、多くの人が毛を触ることで生物感や触れる楽しみや癒しを感じた。また、砂状と同様に視触覚ディスプレイによる共同参加がしやすいことが観察され、それは温冷の場合は表面上には温冷の形が現れにくいのにに対し、毛は視覚と触覚の形と感覚がつながりやすいため視覚と連動しやすく感覚が一致しやすいため参加がしやすいと考えられた。

ふわふわした毛の動きに観客が集まり、触覚を伴ったデジタルサイネージなどの情報通信の可能性が高いことが観察からも定量化実験からもわかった。作品の展示から触覚情報呈示によって能動的な行為を誘発でき、触覚を伴ったデジタルサイネージなどの情報通信の可能性が考えられたため、デジタルサイネージへの応用実験として感性評価と視線軌跡、心拍数、唾液アミラーゼ活性の実験をおこない触覚情報を呈示することによる触る行為への誘発性を活性化することが示された。

感性評価では視覚だけでも毛に投影された視覚だけでリラックスするという結果が取得され、毛を使用し人工的ではあるが生物感を感じるディスプレイの新しい癒しの体験をもたらすことができた。このようなことから触れる体験がもたらす驚きや楽しさ、癒しや参加性など従来のメディア表現にとどまらないメディア体験が拡張できたといえる。

毛が装着されたサーボモータが上下、回転することやモータの音に生物らしさを感じる参加者も多く、生物の代行としての可能性もあることがわかった。ディスプレイに則した画像の工夫によって触覚と画像の相乗効果が見られた。メンテナンスや持続性能については、1ユニットごとの取り替えが可能ないように変更したため、1つの故障にも対応できるようになったため作業の利便性が増した。長期展示という点では、毛のような素材とモータを長時間連続して駆動させるには、隙間からの埃や参加者の乱暴な扱いによりモータに過度の負荷がかかり注意が必要であることがわかった。

以上のことから、本制作は、インタラクティブな毛状生物感覚呈示ディスプレイはサーボモータが上下、回転することシステムと毛状の素材と画像の連動によって人工的なものから生物らしさを表現できる手法を生み出し、心地よい楽しい情動を刺激するような体験を提供がすることができたことで、メディア表現の拡張のための効果があったという結論が得られた。

## 第7章

### 考察

ここでは、視触覚ディスプレイの開発から実装、展示、定量化実験を通してどのような効果や知見が得られたか、また、触覚に焦点をあてた人間・工学・表現の融合がもたらす相互作用について考察する。

#### 7.1 人間の体性感覚に即した表現

人の体性感覚に即した設計として、第4章では温冷呈示ディスプレイでは人の温冷点に注目し手掌部上の一点に温度刺激を呈示した際の温度感覚特性の評価を行った。呈示刺激間の距離の影響について、ほぼ全ての呈示温度条件において、呈示刺激間距離を20 mm 以上離せば識別率は向上する傾向がみられた。とりわけ、呈示する温度のカテゴリを二つ以上離れた条件においては、呈示刺激間距離を20 mm以上にすることでほぼ100 %の識別率が得られた。他方、呈示刺激間距離が0 mm や10 mm の条件では、呈示温度に関わらず識別率は低くなる傾向がみられた。ヒトの温度感覚の空間弁別は圧覚と比べて悪いといわれているが、得られた結果からは、呈示温度に関わらず、ペルチェ素子の間隔を20 mm以上離して配置することで識別率は向上することがわかった。その結果をもとに、15mmのペルチェ素子8×10 列の80個使用した小型温冷呈示ディスプレイの開発をおこない温冷呈示を適切に行うことができた。以上ことよりの人間の体性感覚能に即した設計手法は表現の拡張に有効であるといえると考ええる。

また、第6章では、この視触覚ディスプレイによる人間の心身への影響を視線軌跡、心拍数、唾液アミラーゼ活性、感性評価により調べた。また、触覚情報を呈示することによる触るという行為への誘発性についても検討した。その結果視線軌跡分析に結果から、条件①の視覚のみの実験では映像情報を追従し、条件②の触覚を加えた実験より若干視線移動が広くなることが認められた。条件②の触覚を加えた実験では、映像情報に加えて毛の凹凸運動を触るという行動に影響され、視線移動が少なくなる傾向があった。伝えたい情報を映像と動きの両方で呈示することにより確実にユーザ側に伝えることができることが示唆された。

心拍数と唾液アミラーゼ活性の結果からは、安静時と実験時での差異が認められなかったことから、触覚を加えた情報を呈示してもストレスに感じることはなく、生体への負の影響はないことが示された。安静時と同様であることから視触覚ディスプレイは、リラックスさせる要因を提供できる可能性が認められた。

感性評価の結果から、条件①と条件②の間に違いは認められなかったが、触覚を加えた条件②の方が、楽しさややさしさという印象を与えられる。また、今回用いた視触覚ディスプレイは、触覚という情報を用いない、視覚のみで情報を呈示した場合においても、明瞭さ、ほっとする温かみを提供でき、触れていたいという感情を誘発することができた。このことは、毛という温か

みのある要素とその動きが影響していることが考えられる。つまり、視触覚ディスプレイにどのような情報を提供するかにより素材を選定することによって、有用な情報を提供することができるといえた。

インタビュー結果からも、視触覚ディスプレイは触れていない場合には触れたいという能動的な行為を誘発することができ、実際に触れた場合には触れていたい感情やリラックス効果があることが認められた。

以上の温度の体性感覚に即した設計と視触覚ディスプレイを対象にした人間の心身への影響を視線軌跡、心拍数、唾液アミラーゼ活性、感性評価の定量的な実験から、人間の体性感覚能に即した設計手法を取り入れることによって視触覚ディスプレイの設計の具体的な設計ができ、体験の結果によって視触覚ディスプレイの素材と視覚、触れたいという能動的な行為を誘発する課題を読み取ることができた。

## 7.2 工学システムを使用した表現

### 1) デバイスの特性を組み合わせたシステムデザインの技術的な新規性

従来技術である視覚のディスプレイに対し、本研究では、表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した触覚呈示を視覚と同一箇所に表現を感受することができるディスプレイ装置を開発した。具体的な触覚として、第4章でペルチェ素子を使用した温冷感覚呈示、第5章で電磁石と微小なスチールボールを使用した砂状硬軟呈示、第6章ではサーボモータと毛状の棒を使用し生物感覚を呈示した視触覚ディスプレイを開発し、そのシステムと公開した結果を述べた。温冷呈示を視覚と同一箇所に表現を感受することができるディスプレイ装置とふわふわ呈示の駆動部分の技術的な新規性に対し、3件の特許[153,154,155]を取得しているほか、トップレベルの国際会議にも採択され新規性および学術的価値は一定の評価を得ている。

### 2) 電子部品や素材の組み合わせで多様な触覚呈示ができるシステムの応用性

3つの章で示したディスプレイのシステム構成は、観客の触る行為にインタラクティブに対応するシステムとして、光学式タッチパネルで取得した位置情報を画像と駆動系へ同時に送信し呈示する統一したシステムとした。3つの章で異なる点は触覚呈示に関し人間の体性感覚能に即し、駆動系をそれぞれの感覚にあったアクチュエータと素材で触る感覚を使用することで異なった触覚の呈示と、それぞれの触覚のイメージにあったCG映像を投影することで同じシステムで異なった視触覚体験を提供することができた。ディスプレイ自体の使用素材はペルチェ素子や電磁石、サーボモータなど古くから使用されている基礎的な電子部品を使用しているが、駆動部分とディスプレイ表面の素材の組み合わせとCG画像のプログラム制御の総合的なシステムデザインによって体験者は驚き、楽しむ姿が観察されたことから今までに見たり触ったことがない触覚呈示や新しい体験のできる表現を創出していると考ええる。またこれは、本論文で呈示した触覚以外の感触でも1つのシステムで基礎的な電子部品や素材の組み合わせで多様な触覚呈示ができると考える。

具体的には、第4章でのペルチェ素子を使用した温冷呈示のシステムでは、応用としてディスプレイの上に熱に反応するサーモシートを敷き温度を視覚化することを試みた。このように温冷呈

示できるディスプレイの性能を使い、温度に変化する素材、例えば温度によって柔らかくなったり、硬くなったりするゴム系の素材をディスプレイ面に敷いたり冷温によって湿度を感じる感覚の呈示や温度差によって発電する素材を使用することで、温冷呈示以外の触覚を呈示することが可能だと思われる。

第5章での電磁石を使用したディスプレイでは、応用として微小なスチールボールの代わりに電磁石に反応するリードスイッチと小型振動モータやLEDを使用したボールの中を置くワークショップを行った。多くのボールを電磁石ディスプレイに置くことで、ディスプレイの表面から変な音がしたり、光ったり、振動するボールの触覚体験ができた。他にも例えば、ソレノイドのように、電磁石に反応して凹凸させることも可能だと思われる。

第6章でのサーボモータを使用したディスプレイでは、ふわふわの毛の代わりにトゲトゲのものに付け替えたりすることで別の感触を体験出来ると予想される。

このように、本論文で開発したディスプレイを使用し他の素材と組み合わせるだけでも今後様々な触覚呈示ができることが考えられる。観客の驚き、楽しむ様子から駆動部分とディスプレイ表面の素材の組み合わせと触覚にあったCG画像を同時に制御するプログラムの総合的なシステムデザインによって新しい触覚呈示や表現を創出し工学システムの表現への拡張を提案した。

### 3) 触覚呈示解像度について

温冷呈示ディスプレイの解像度に関しては、格子状にペルチェ素子を配置するのに際し、ペルチェ素子同士の間隔が20mm空いている本ディスプレイでは支障なく温度の違いを弁別することができた。しかしながら、温度ディスプレイが凹凸や振動刺激に触覚刺激に比べ掌での弁別に関して乏しく温度呈示単独での情報呈示用途としては、本実装でも示したように工夫や温度に特化した応用を考える必要があることがわかった。

砂状のディスプレイは、60mm間隔の電磁石を配置し上面に砂状スチールボールを設置したディスプレイに直接映像を投影した。砂場を設定したディスプレイでは、60mm間隔の電磁石による触覚呈示には違和感がなかったが、触覚のみで文字情報を伝えたりするには視覚障がい者が使用するピンディスプレイのような解像度が必要なる。何を体験してもらいたいかに合わせた触覚の解像度の呈示で十分作品としての表現をすることができた。それは、ふわふわのディスプレイも同様であり、触覚呈示の解像度に合わせたコンテンツや目的の設定が必要であることがわかった。

### 4) ユーザが快適に操作できる可動機構と画像が連動するための制御の工夫

インタラクティブ作品には、観客の行為に対しどのようなインタラクションかがわからない表現もあり、そこで観客のストレスを与えることある。本開発では、触ったところの触覚呈示と画像がともに連動して気持ちよくインタラクションすることを心がけた。そのためにインタラクティブに描画できる高速CG画像生成方法の工夫と高速で反応するタッチセンサーと連動する駆動部分のプログラムを行った。その結果温冷呈ディスプレイ時「雪とアナの女王」の1シーンのように観客の手の動きとスムーズに連動して氷のCGが描画され、ストレスなくスムーズでわかりやすい操作性を成功させたと考える。ただし、画像がリアルタイムに生成されるが、触覚呈示は使用した電子部品の特性によって反応速度が異なる。電磁石やサーボモータは即時に反応するが、



ペルチェ素子の温度呈示には特性上タイムラグが生じた。そのために、画像との連動に工夫が必要だった。温度呈示速度は、ゲーム機使用するような反応速度を持っていないにもかかわらず、温度の変化のインタラクションを感じ取れた要因として、温度と映像や音の合致するイメージを制作したコンテンツとしての工夫、次に初期温度呈示を早くしある程度持続させると温度を早めに切る制御の工夫、熱を早く放熱するために適正な放熱板やファンの使用によるハードウェアの工夫があった。

また臨場感の増幅という点を考えると、映像や聴覚刺激を付加することで触覚知覚に影響をおよぼすことが明らかになっているように映像や音によって触覚が影響されることが考えられる。冷たい映像やそれにあった音を呈示すると触覚も冷たく感じられる。物理的にも冷たくすると、実温度より増幅されより冷たく感じるができることと考える。別の言い方をするならば、映像や音が加わった温度触覚刺激は、少ない温度変化で効果を得ることができるのではないかと考える。それゆえに体験者は少ない温度変化にもかかわらず予想より冷たく感じ驚いた様子が観察されたと考える。砂のディスプレイではバネのねばねば感のある映像によって磁石のひつつきをより臨場感を増幅することができた。メタボールの有機的な湾曲に合わせ、砂を寄せ集めたり、山を作ったりする動作も見られた。画像によって人を誘導し、ゲーム性のあるような画像も人の目に止まり触れることで長い時間留まる可能性がある。

毛状ディスプレイでは、3種類のコンテンツの切れ目に一斉に駆動部分の動きが変わり、画像と駆動部分のインタラクションが鮮明に理解できるような工夫をしたことで、インタラクティブ作品にありがちな何と何がインタラクションしているのかわからない状態を排除し明確にインタラクションを表現できたと考える。ユーザが快適に操作できる可動機構と画像が連動するためのコンテンツや制御の工夫が必要であることがわかった。

## 7.3 メディア体験の拡張

### 1) 触覚呈示と視覚・聴覚感覚の連動による体験のデザイン

本論文では知覚行動による触覚分類を元に三種類の視触覚ディスプレイの開発とその表現をおこなった。触覚知覚の例として、皮膚感覚のみの知覚である温冷呈示を、触運動知覚の例として、皮膚感覚と運動感覚が共に働くことで得られる砂状の硬軟呈示を、運動感覚の例として、上下回転する毛状の動きに生物的な感覚を生み出す呈示を示し、視覚効果だけでなく触ることによって体験できる新しいメディア表現を図った。

三種類の共通の体験として視覚だけでなく触覚が加わったことによって、体験者のディスプレイに注視する時間やディスプレイそのものを触る時間が増え、触ることで驚きや楽しさを、また新しい驚きを参加者と共有し会話の増加や、逆に誰もいない時間を見計らって一人で没頭して体験する姿やリピートする姿がよく観察された。

異なる知覚行動による特徴として、皮膚感覚のみの知覚である温冷呈示ではその場でじっと触って初めてわかる体験であり、皮膚感覚と運動感覚が共に働くことで得られる砂状の硬軟呈示では、手を動かし形造ることでわかり互いのコミュニケーションが生まれやすい体験であり、上下回転するアクティブな毛状の動きに生物的な感覚を生み出す呈示ではディスプレイそのものに生物

的なものや感情が生まれやすい体験であることが観察された。これは、知覚行動と関連した体験をデザインすることができる本論文の例が成功したと考えられる。また、ディスプレイが長期的にも展示の実績があり、安全性にも配慮されていることからインタラクティブな触覚呈示可能なデザイン表現が実社会へ向けた展示や体験をデザインすることが可能であることが考えられた。

## 2) 体験物までのアプローチ

インタラクティブ性のない絵画や造形部やプロダクトとは違う、インタラクティブ性のある作品ならではの体験のデザインについて考えるために、本ディスプレイの展示で体験をデザインする方法として、観察された体験者が体験物までのアプローチに必要なこと考える。

まずは、遠くから見るばかりでなく、近づいて触ってもらうことが必要であり、そのための工夫が必要であると考え。遠くから注目される映像や音の演出もあるが、思わず近づきたくなる触覚や視覚的な見え方から触れたくなる触覚素材もあると考える。6章の6.2の感性評価では、「触れたい」と「近づきたい」の相関関係が強いことがわかった。その結果からも、体験型のディスプレイにおいて体験物までのアプローチと「触りたくなる」「近づきたい」ことが重要であり本ディスプレイは近づきたくなる要素を持ったディスプレイであることがわかった。

## 3) 素材の見え方と触覚について

ふわふわ生物感覚視触覚ディスプレイの展示を通じ、触れたいという能動的な行為を誘発することが考察されたが、触りたくなる行為と素材の見え方には関連があるのではないかと考える。温冷ディスプレイは電子部品が半透明に透けて見えるので、何か仕掛けがあることを想像はできるが温冷であることは触ってはじめて気がつく。温度に関しては外見からどのような状態なのか判別はつかないので、温度に関してははじめてディスプレイを見た人が触れたいという能動的な行為の誘発は低いと考える。

砂状のディスプレイに関してははじめて見た人が砂状の素材のつぶつぶ感を触ってみたいという行動は観察された。砂を模した微小スチールボールが砂場の砂を連想させた。砂状のディスプレイ表面がフラットに綺麗に整えられた表面よりも砂場のように起伏のある形状の方が触りやすいことも観察された。それはフラットに整えられた表面を壊すことに対する抵抗があり起伏のある形状の方が人の痕跡に安心感を得て触りやすくなるのではないかと考える。表面の形状と触りたくなる行為には関係性があるように考えた。

毛状のディスプレイに関しては、柔らかな毛状という素材そのものが触れたいという能動的な行為を誘発すると考える。それは、これまで動物やぬいぐるみを触ったやわらかさや安心感や楽しさの触経験の記憶から柔らかな毛状に思わず触りたくなることが考えられる。触経験と触れたいという能動的な行為の誘発には関係性があると考えた。6章の6.2の感性評価では、「触れたい」と「近づきたい」の相関関係が強いことがわかった。

以上のことにより素材の視覚的な見え方によって触れたいという能動的な行為の誘発には関係性があると考えた結果、本ディスプレイには毛のような素材は触れたいという能動的な行為を誘発されることがわかった。温冷呈示ディスプレイの亚克力や砂状のスチールボールに関しては、ヒアリングや行動から触れたいという能動的な行為のしやすさはうかがえたが感性評価を行

っていないので、今後の課題としたい。

#### 4) 体験の驚きについて

予測不能な突然の体験や意外な体験、未知な体験をすることで、人は驚くことがわかっている。さらさらの砂状の微小粒をさわって、はじめは本当の砂であると思った参加者もいた。砂が手につかずさらさら感が気持ち良いという意見が多く聞かれた。これは、微小スチールボールにつや消しの錫メッキをしているため、微小スチールボールの表面に分からないくらいの細かな凸凹がありそれが手にくっつかない工夫がしてあるためであり、映像反射せずに砂に投影できるようにつや消し加工をした工夫が触覚としても気持ち良い感触を得ることができたと考える。また、微小スチールボールを砂に見立てて使用する例はこれまでになく、新規性があると考えられる。

さらさら感と同時に、波打ち際の砂のように少し重たい、ウェット感を不思議に思う観客も多かった。同じ砂場に2種類の違う感触の砂をインタラクティブに体験できたことが新鮮だった様子が観察から伺えた。これは、このディスプレイで体験する砂遊びが新鮮な驚きをもたらしたと考えられる。

#### 5) ディスプレイサイズによる体験方法の違い

ディスプレイのサイズによって体験方法の違いが見られた。9インチ、15インチ、20インチディスプレイでは指先で表面の温度を触るだけでなく掌を押し当て、滑らせる行為があった。

9インチ80ピクセルのディスプレイでは掌に温冷を同時に触ることによって得られるサーマルグリルイリュージョンのような触覚の錯覚を引き起こし、小型で解像度の高いものならではの温度体験を提供することができている。

50インチ、70インチサイズのディスプレイでは体を載せたり、頬をつけたり、腕全体をディスプレイに押し当てる行為が見られた。触る部位によって楽しみ方も異なり、サーモチェアでは、臀部で温度を感じるによって、ムズムズした感覚を提供した。2015年電通大のユリアラビリンスは、臀部に冷温を当てることによって尿意を感じるシステムを提案している。この例からも体の部位によって皮膚表面で温冷を感じるだけでなく、温冷を感じることでむずむずしたり、尿意を感じたり、汗をかくなど体の深部まで及ぼす効果が予想される。これは、例えば、体の機能の衰えた人に対し、温度刺激を与えることで機能を気づかせたり、回復させたりことに役立つかもしれない。

#### 6) コンテンツの体験時間と体験方法

コンテンツの体験時間は体験型の作品を展示する上で大きな配慮を必要とする。温冷コンテンツでは3つの異なった映像を各1分用意し、1分ごとに自動的に変わっていくようにプログラムを行った。体験者は飽きることなく異なった映像を体験できていたが、気に入ったコンテンツを何度も体験したい体験者もいたことを考えると体験者が自分でコンテンツを選べるという選択もあると考える。また一度だけの体験で満足することなく何度も体験してもらうための工夫として、バージョンアップやコレクションが貯まるようなゲーム要素を入れたコンテンツの開発もある。本開発のディスプレイの一度に体験できる人数は、ディスプレイの大きさによっても変わる。

限られた展示期間内で多くの体験者に体験してもらう方法や混雑時の対応など配慮が必要である。本研究で開発した展示の体験方法は HMD などのインタラクティブ作品で使用されるような装着物がなく、専属に人員は必要としない。展示形態はオープンなテーブルトップの形態であったことで、実際近くで触ることができる体験者以外でも遠くからどのような体験物が理解できたことはインタラクティブな展示物として公共のスペースに展示しやすさがあったといえる。そのため、アルスエレクトロニカセンターや大阪技術科学館やつくばエキスポセンターでの常設展示が可能だったと考える。

## 7) 触覚コミュニケーション

ふわふわディスプレイでは、「本物の生き物は触れないけどこれは触れる」、1つのふわふわを指して「この子は元気だ、がんばれ」と機械に感情移入するような発言も見られた。見知らぬ人がディスプレイを応援するような場を観察できた。

砂ディスプレイでは、砂場と同様な展示をしたため、自然と人が集まり、個人で黙々と砂遊びをする参加者もいれば、共同で何かの形を作ろうとする参加も観察され、コミュニケーションの場の創出には適した装置であると考えた。天然の砂のように手にくっつくこともなく、室内での遊びに適した次世代の砂場の提案としても期待がもてた。

視触覚インタフェースに触る体験者の姿を外部から見ることで人が集まり、知らない人とも触る体験を話題に会話しながら同画面で実物体に触る体験の観察から、実物体に触るからこそ繋がる新しい触覚を使用したコミュニケーションのデザインを創出できると考えた。触覚デザインの点では、触ることができる広告媒体デジタルサイネージ、触覚のブランディングデザインや触る体験を豊かにするワークショップや積極的に質感や感触などの触覚をデザインすることによって、デザインの質や触ることによって得られる触覚デザイン体験を豊かにすると考えた。

## 7.4 持続可能な体験表現手法

### 1) 何度も体験してもらうためのコンテンツの工夫

何度も体験してもらうためのコンテンツの体験時間や内容、発展性、参加性の工夫が必要である。

温冷コンテンツでは冷温コンテンツ 2 件、暖温コンテンツ 1 つの合計 3 つの異なった映像を各 1 分用意し、1 分ごとに自動的に変わっていくようにプログラムを行った。体験者は飽きることなく異なった映像と触覚の連動を楽しみながら体験できたことが観察された。気に入りのコンテンツを再度体験したい場合も 2 分程度ならストレスが少なく過ごせ、体験者によってコンテンツの好みが違うこと、コンテンツの違いにより表現のバリエーションを楽しんできた様子が観察された。このことによって、複数のコンテンツを用意することは継続的に何度も体験してもらうためのコンテンツの工夫として効果があったことがわかった。しかし、気に入ったコンテンツを何度も体験したい体験者もいたことを考えると体験者が自分で体験したいコンテンツを選べるという選択もあると考える。また一度だけの体験で満足することなく何度も体験してもらうための工

夫として、ポケモンゲームに代表されるように、バージョンアップやコレクションが貯まるようなゲーム要素を入れたコンテンツの開発もある。

現実の砂場のような遊び方をする体験者も多く見られた。砂をかき集めたり、ばらばら砂を落としたり、砂場で見立て遊びをするように川や山や道をつくったり、友達と協力して全部の砂を寄せ集めたり、ものを置いて物語を語ったり、仕掛けのある装置としてではなくただ砂との戯れを楽しんでいる光景も見られた。無心に遊べる砂遊びと同様な癒しの場を提供した。提案者が全ての演出をするのではなく、参加者の工夫の余地を残した点が持続可能な体験のヒントになると考える。

## 2) 知的好奇心を刺激する工夫

制作者側がすべてのインタラクションを制御するばかりでなく参加者の知的好奇心を刺激する工夫が必要に考えた。温冷呈示ディスプレイでは、どのようなデバイスを使用したかわかるようにディスプレイ表面にフロスタクリルを使用し内部の構造が見えるような工夫をした。このことで、立体的に映像がプロジェクションされる美術表現の面白さと同時に科学的な知的好奇心を刺戟する効果を狙っている。体験者が自ら何かを発見できる喜びの余地を残すなど、遊びのようなエンターテインメントの要素と先端技術の面白さを伝えるためのバランスが必要になると考える。

砂状ディスプレイでは、そのうち誰かが、何か仕掛けがあることに気がつき、この部分は砂が硬くなるとかどうすれば硬くなるか砂に隠れていた装置の仕組みを発見し、気づいたことに喜び、友達に教えて自慢したくなる。友達を呼んで、一緒に体験しようと誘う。宝探しをするように、反応している電磁石を探しスチールボールでできた砂をくっつけ実験し、自分で遊び方を考え工夫する体験の様子をよく見かけた。これは、磁石遊びは低学年の理科でも体験するが、科学遊びと表現が一緒になって知的好奇心を刺激しているように思われた。

## 3) 触経験と情動

1度限りの驚きの触体験で終わってしまうのではなく、何度も見たくなる、触ってみたいくなる継続性のあるインタラクティブ作品はどのようなものであろうか。心に残る作品とはどのようなものだろうか。触経験と情動について考えてみたい。

ふわふわディスプレイの展示時、触っていると亡くなった猫のことを思い出し悲しいという意見があった。個人の強い悲しみの体験をディスプレイでの体験で呼び起こし思い出させている。第6章の6.2の感性評価では、「触りたい」と「近づきたい」「やさしい」「楽しい」「癒される」「魅力的な」の相関関係が強いことがわかった。第5章の5.5で電磁石のディスプレイを使用したワークショップを紹介した。そこでは電子工作をしながら自分で電磁石のディスプレイ上で遊ぶデバイスをつくる。半田ごてを持って、時には火傷しそうになりながら悪戦苦闘した記憶が触体験とともに思い出になると考えた。そのような情動を伴うような思い出やワークショップなど記憶に残るような「こと」の仕掛けが本ディスプレイを触ったことに伴って思い出として記憶に残す方法であると考えた。

#### 4) 公共の展示物としての安全性配慮したアクセシブルデザイン

視覚障がいのある方への体験によって、障がい者と健常者が同じ場で情報を共有できる場の構築の可能性をみることができた。高齢化社会へ向けて福祉支援、幼児への発達心理、体験型の教育など研究の波及効果を期待できることがわかった。視触覚のインタラクションの研究は、福祉や高齢化社会に新しい触覚情報デザインによるアクセサビリティを社会へ浸透させ福祉社会の意識の向上を図ると考えられる。

公共の場において、老若男女に体験してもらう配慮として、安全に体験してもらう工夫がある。

電磁石を使用したディスプレイでは、ペースメーカーや時計を装着したままの体験者には注意が必要だった。ディスプレイ面の高さなどに躯体に対しては安全性に配慮したが、デバイスそのものについて剪定の工夫が必要に思われた。また、スチールボールを直接触ることで、周期的にスチールボールの洗浄が必要だった。金属アレルギーの体験者にはあらかじめ周知が必要であった。事前の情報の開示をすることで、安全な展示が可能になると考える。

#### 5) 展示品としての耐久性

メディアのハードウェアやソフトウェアに依存することの多いインタラクティブメディア作品が抱える課題の一つとして作品の寿命がある。体験者の頻繁な使用に対し、安全に長期の展示に耐えうるか。年代を経た作品を再現可能であるか技術的にも躯体設計にも課題がある。本章で開発したディスプレイは、科学館での2年間以上の常設に耐えている。また2015年4月1日から9月31日までの6ヶ月間、首都大学東京にて10:00-17:00の展示時間で温冷呈示50インチディスプレイの常設展示をおこなった。ここでの課題は、開発時のコンピュータ(Windows2000,XP)のプログラムが最新バージョンのコンピュータ機器に移行し再現が可能であるかであったが、無事実装することができ、プログラミングや設計回路の保存など詳しい資料を保存することで再現が可能であることがわかった。美術館や科学館でメディア作品を収蔵し、アーカイブする問題として、再生する周辺機器も一緒に保存しなければ作品の再現ができない課題があるが、作品を論文化し記述することで残る作品の残す方法の重要性を改めて認識できた。

メディアのハードウェアやソフトウェアに依存することの多いインタラクティブメディア作品が抱える課題の一つとして作品の寿命がある。体験者の頻繁な使用に対し、安全に長期の展示に耐えうるか。年代を経た作品を再現可能であるか技術的にも躯体設計にも課題がある。本章で開発したディスプレイは、科学館での2年間以上の常設に耐えているので、設計上は問題がなかったが、消費電力が大きいという点は今後の課題である。

また、メンテナンスや持続性能については、機器の取り替えについての配慮として1ユニットごとの取り替えが可能ないように変更したため、1つの故障にも対応できるようになったため作業の利便性が増した。長期展示という点では、毛のような素材とモータを長時間連続して駆動させるには、隙間からの埃や参加者の乱暴な扱いによりモータに過度の負荷がかかり注意が必要である。また、強く抑えると毛先が曲がり、回転運動を妨げることがあり、毛の軸の素材の検討が必要であると考えられる。使用する素材と耐久性への配慮が必要であることがわかった。



## 6) ディスプレイとしての発展性

今回は、微小スチールボールをディスプレイ面に敷き、砂場のような場を提供したが、電磁石を使用したディスプレイとして考えた場合、電磁石の特性を生かした遊びも考えられる。例えば、電磁石によってスイッチがON,OFFになるデバイスを組み込んだ玩具や電磁石によって動く形状記憶素材など、さらさら感、ずっしり感の砂場以外の感覚を呈示できるディスプレイにもなると考える。そこで、この電磁石ディスプレイを使用した、電子工作のワークショップを開催し、参加者自らがこのディスプレイ上で光ったり、振動したり、動いたりするものをアクティブに制作することによって一つのディスプレイから様々な触覚呈示の応用ができることを示すことができた。

## 7) 癒し効果

体験者の意見として、動物は怖くて触れないが、このディスプレイは触ることができ、色が変わったり、雲が流れたりしてキレイだった、癒されると言う意見があり、動物に変わるセラピーとしての効果があると考えた。6章の6.2の感性評価でも、「触れていたい」と「温かみのある」「癒される」「心地よい」の相関関係が強いことがわかった。

サーボモータの駆動音が、生き物の鳴き声に聞こえ、機械ではあるが生物的だという意見も多く聞けた。飼っていた猫を想いだすなど、柔らかい毛を触ることで触覚記憶を呼びさますなど、触覚と視覚の同時の刺激によって今までにない新しい視触覚ディスプレイの体験を提供できた。

音がひよこの鳴き声みたいで、触っていると生きているように感じる。電子音ではなく、生の駆動機構の音と凹凸がリンクしていることが安心できる。色々な角度の毛先があって自然でいい。機械で動いていることを忘れそうになるほど気持ちよくて癒され、愛情を感じてくる。という意見があり、全盲者にとっても健常者と同様に生物感を感じたとの意見を得ることが出来た。

楽しみを共有できるという点では本研究が障がい者にとっても有効であると考えられるが、触覚研究においての有効性は今後更なる生体的データを取得し人間工学的な検証が必要であると考ええる。

## 7.5 まとめ

本研究は、芸術と工学と感性の融合による研究を背景としている。工学システムを活用した表現、人間の体性感覚に即した表現、メディア体験を拡張した表現、持続可能な体験表現手法を目指すアプローチからメディア表現の拡張手法について述べ、互いの分野が関係しあうことにより拡張したメディア表現が確認できた。

工学システムの表現への拡張については、デバイスの特性を組み合わせたシステムデザインの技術的な新規性は工学的知見が必要である、電子部品や素材の組み合わせで多様な触覚呈示ができるシステムの応用性、触覚呈示解像度については人間の触覚特性と深く関わる。ユーザが快適に操作できる可動機構と画像が連動するための制御の工夫は人間がストレスなく体験できる知見も今後必要である。

また、人の触覚特性にあったディスプレイの仕様の決定のために人の触覚特性について調べ、温冷呈示の弁別域を明らかにしたことで、適切な温冷感呈示ディスプレイの基準を作ることができ

た。

さらに、過去の知覚表現からの知見や触覚呈示と視覚・聴覚感覚の連動による体験のデザインや体験物までのアプローチは工学と人間の感性と深く関わる。素材の見え方と触覚について、驚きの体験について、ディスプレイサイズによる体験方法の違い、コンテンツの体験時間と体験方法、触覚コミュニケーションについても人間の感性と視覚や体験の知見と深い関わりがあると確認できた。

持続可能な体験表現手法では、何度も体験してもらうためのコンテンツの工夫や知的好奇心を刺激する工夫、触経験と情動、公共の展示物としての安全性配慮したアクセシブルデザイン、展示品としての耐久性、ディスプレイとしての発展性、セラピー効果について述べたが、情動やセラピー効果については感性工学と連携しさらなるデータの収集が必要だと考える。

## 第 8 章

### 結論

#### 8.1 人間の体性感覚に即した表現

2 章では温冷ディスプレイを開発する為にメディア表現の拡張の手法として、人間の触覚特性にあったディスプレイの仕様の決定のために人間の温度感覚には、空間分解能が低いという体性的特性を生かした開発が必要であることがわかった。

3 章では開発のために、触覚呈示ディスプレイを開発するために人間の温冷呈示の定量化実験をおこなった。その結果、そこから温冷呈示ディスプレイ呈示には格子状にペルチェ素子を配置するのに際し、ペルチェ素子同士の間隔が 20mm 空いていると支障なく温度の違いを弁別することがわかり、本ディスプレイの温度弁別性能が確認され適切な温冷感呈示ディスプレイの基準を作ることができた。

また、温冷呈示と画像をインタラクティブに一致させる制御方法の工夫によって温冷呈示によって参加者に新しい体験を提供できたことが行動観察やアンケートからわかった。毛状のディスプレイではアイトラッカーや心拍、感性評価により触れるディスプレイデザインの癒し効果があることを得ることができた。メディア表現の拡張手法として、人間工学から温冷呈示の弁別性能の確認し人間の体性感覚に即した開発手法を示した。その結果を生かしメディア表現から視触覚ディスプレイを使用した新しい体験のメディア表現が可能となった例としてひとつの表現創出のための拡張のための効果があったという結論が得られた。

#### 8.2 工学システムを使用した表現

視触覚ディスプレイはセンサーの応答速度と画像処理と駆動部分の制御を正確にかつ安全で安定して運用できることが重視される。本研究で開発した温冷呈示、硬軟呈示、毛状感覚呈示による視触覚ディスプレイは観客の反応に対しセンサーによる応答速度と画像処理と駆動部分の制御を正確にかつ安全で安定して運用でき要件を満たした。工学からのシステムの組み合わせと制御手法を示した。従来技術である視覚のディスプレイに対し、これまで表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した温・冷の呈示を視覚と同一箇所に表現を感受することができるディスプレイ装置に対する特許や画像と触覚呈示の合わせ方の工夫に対する特許や新規性に対する国際学会での採択など技術や表現の新規性に対する評価もありメディア表現としてのみならず、工学としての触覚呈示への応用や福祉、触覚が加わったデジタルサイネージなどの情報機器の呈示装置として可能となり、工学技術を応用したことで新しい表現が可能になった。

### 8.3 新しいメディア体験による表現の拡張

皮膚感覚のみの知覚で表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した温・冷の呈示を視覚と同一箇所に表現を感受することができるディスプレイ装置を使用し映像と触覚がインタラクティブに連動する特徴を生かした表現を制作した。温冷感では温度の呈示にあわせ雪や氷や植物の成長の映像をリアルタイムで生成したシミュレーション画像を温冷呈示と同期させた。その結果、温度と映像や音の合致するイメージを制作した工夫や初期温度呈示を早くし、ある程度持続させ温度を制御する制御方法の工夫によって、観客に今までの予想にない温度体験による驚きや映像と触覚が一致する楽しさを提供できることがわかった。メディア表現の拡張手法として、工学からのシステムの組み合わせと制御手法を示した。人間工学から温冷呈示の弁別性能の確認し人間の体性感覚に即した開発手法を示した。その結果を生かしメディア表現から視触覚ディスプレイを使用した新しい体験のメディア表現が可能となった例としてひとつの表現創出のための拡張のための効果があったという結論が得られた。また、温冷呈示の応用として、ゲームデバイスとサーモチェアの開発をした。その結果、温冷感覚の接触部位が変わると身体への伝わり方が違うことが観察できた。温冷感覚は、接触部位が指側面部である場合に温冷感を利用したゲームシステムを利用する場合、温冷感を効率よくユーザに提供する為には、ペルチェ素子との接触部位や温度変化値等に関する考察が必要となる。これに関しては本研究と並行し基礎実験を行うことで、実験結果を随時本研究に反映させていった。ペルチェ素子を駆動してからユーザが「暖かい」「冷たい」と認知する間のデバイスの出力性能との遅延について温度変化と速度と反応時間に関する実験を行った。その実験では、本コントローラデバイスにおいてユーザに温冷呈示を気づかせる場合、少なくとも2[s]程度の呈示時間が必要であり、ゲームの難易度によって1~2[s]の調整が必要であることがわかった。サーモチェアでは、臀部への温度変化値の取得は今後の課題であるが、体験や観察の結果から、指側面部より反応時間が遅延するなど鈍感であることがわかった。このことより、温冷感覚を伝える装置においては、想定される接触部位による反応の遅延の差を考慮した上で、他の情報、例えば視覚情報、の呈示との同期を図る必要があるという知見を得た。

5章では、皮膚感覚と運動感覚が共に働くことで得られる砂状の硬軟呈示が可能で体験者同士のコミュニケーションが共有できる触覚呈示ディスプレイを目指した。表示部材の表示面を触ることによって、視覚情報に適した硬軟の呈示を視覚と同一箇所に表現を感受することができる砂状の硬軟感覚を呈示できるディスプレイ装置を開発した。その結果砂状の硬軟感では電磁石に引き寄せられるスチールボールとバネのシミュレーションの相乗効果で吸い付くような重みのある砂の感触が新しい体験として提示され、砂遊びの新しい楽しみ方を提案することができた。視覚と触覚を共有できる砂状の硬軟ディスプレイを使用すると参加者同士の会話が多くなりその光景に触発され積極的に参加する観客が多く見られた。さらに、参加者が触体験を共有できるワークショップを開催したことで、触覚体験を共有する意識を促進し、記憶に残る触覚体験を提供した。電磁石を使用したディスプレイを磁力源とする二次的な使用方法を提案し、手に中に収まるパーソナルな触覚呈示ができるデバイスを個々が制作できるワークショップ体験は、日常の触覚体験を気がつかせ、触覚体験の学習や「触わって感じる力」を養いことで、触覚体験が日常生活へのさらなる発展性を見ることができた。その結果、素材を変えることに加えワークショップでの

体験を通じ共有できる触覚呈示ディスプレイの参加性の増加の効果があることがわかった。

6章では、運動感覚の例として、上下回転する毛状の動きに生物的な感覚を生み出す積極的に触りたくなる素材によって異なった触覚感覚の体験が得られるのではないかと考え、生物的な感覚を得るため毛の素材を使用しディスプレイを制作した結果、多くの人が毛を触ることで生物感覚や触れる楽しみや癒しを感じた。また、砂状と同様に視触覚ディスプレイによる共同参加がしやすいことが観察された。温冷の場合は表面上には温冷の形が現れにくいのにに対し、砂や毛は視覚と触覚によって得られる形と感覚がつながりやすいため感覚的理解が促進され、その結果、楽しさにつながりやすく参加しやすいと考えられた。感性評価では視覚だけで毛に投影された視覚だけでリラックスすることが確認され、毛状の素材と画像の連動によって人工的なものから生物らしさを表現できる手法を生み出し、心地よい楽しい情動を刺激するような体験を提供がすることができたことで、メディア表現の拡張方法を提案することができたという結論が得られた。

## 8.4 まとめ

本稿ではメディア表現の拡張手法として、工学からのシステムの組み合わせと制御手法を示した。人間工学から温冷呈示の弁別性能の確認し人間の体性感覚に即した知見を得それを元にしたディスプレイ開発手法を示しディスプレイ表現としての拡張を提案した。その結果を生かしディスプレイ表現から触ることのできる視触覚ディスプレイを使用したメディア体験の拡張が可能となり、本研究で確認した人間の知覚特性への考慮は、芸術と工学と感性の融合によるひとつの表現創出を拡張のために効果があったという結論が得られた。

## 8.5 今後の課題

### 1) システムの改善

システムの改善について、7章の考察にシステムの改善点を記述したが、全体システムとして、インタラクションの為にタッチセンサーに多点方式を採用し、多人数に対応したい。システムが大型で消費電力が大きい為、省エネルギーを目指す必要がある。小単位のユニット化をすることで省エネルギーでフレキシブルなディスプレイデザインがすることが可能になると考える。

### 2) 機器の性能や特性を組み合わせるシステムデザイン

本論文では、触行動の三分類である触知覚・触運動知覚・運動感覚に習い、触知覚の例として、皮膚感覚のみの知覚である温冷呈示を、触運動知覚の例として、皮膚感覚と運動感覚が共に働くことで得られる砂状の硬軟呈示を、運動感覚の例として、上下回転する毛状の動きに生物的な感覚を生み出す呈示をおこなったが、これまで触覚呈示として行われていない呈示方法と素材や行為の組み合わせも考えられる。機器の性能や特性をどのように組み合わせれば、どのような効果が生み出せるのか組み合わせた触覚統合表のものがあると有用だと思われる。

### 3) 人間工学データの収集について

触覚ディスプレイを体験時の人間工学のデータは、今後の研究に有益であり、広く知見を活用するためにも検証データの取得を検討したい。呈示の高さ、位置、形と触覚に関するデータや公共空間での使用に関する人の動きやコミュニケーションとしての効果など検討したい。

#### 4) 情動と触覚表現について

温度と映像や温度と音、温度と情動や様々な触覚と情動など提案されたインタフェースが感性としてどのような効果をもたらすのか検証も必要な課題である。他の感覚器官との組み合わせるマルチモーダル/クロスモダル（共感覚）な効果については、多分野からの必要性からも人間の体性感覚能に即した設計手法について感性工学や人間工学のデータから究明することは必要だと考える。

2015年、筆者らは情動と触覚の関係をテーマとしたプロジェクトをスタートさせた。これにより触覚と人間に関係を解明する手がかりになると考える。

#### 5) アクセシブルデザインについて

視覚障がいのある方に対しては、今の時点では新しい触覚体験を提供するディスプレイにとどまっており、触覚ディスプレイとしての解像度には課題がある。視覚障がいのある方がこれまで使用している点字や点図と組み合わせや、音声との組み合わせで視覚情報の補助をすることでアクセシビリティの高い視触覚ディスプレイを提供できると考える。

日常の情報活動をも支援する触覚コミュニケーションについては心理や情報、医療・福祉、建築や社会システムなどからのアプローチが必要であり融合分野のさらなる交流と刺激を期待したい。2015年、筆者らは盲学校の教員と共同でタブレット端末と点字を組み合わせた教育システムを提案した。専門家を交えた研究によってより対象者に適したインクルーシブなデザインやシステムの提案ができると考えている。

本研究で制作されや作品や研究がさまざまな分野で刺激しあい、のびのびといろいろな分野で新しい創造の場を提供することを期待したい。



## 謝辞

本論文は筆者のこれまでまとめられなかった研究を元に，筑波大学大学院 人間総合科学研究科 博士後期課程芸術専攻課程在学中にまとめ，発展させた成果である。

筑波大学大学院 人間総合科学研究科 教授 五十嵐浩也先生には指導教官として本研究をまとめるにあたってご指導をいただいた。ここに深謝の意を表する。同部門教授 感性情報学山中敏正先生には，主査として研究骨子から細部に渡り的確で具体的な論文指導をしていただいた。先生の指導なしには博士論文提出までいきつくことができなかった。同部門准教授 山本早里先生には副査として本論文の構成に関し重要な指導をしていただいた。システム情報工学研究科准教授 星野准一先生には専門分野からの的確な指摘をしていただくことができた。ここに深謝の意を表する。

筆者の研究は様々な方のお陰でここに至っている。特に感性評価の共同研究をしていただいた首都大学東京システムデザイン研究科インダストリアルアート学域教授 笠松慶子先生，サーモゲームデバイスの開発の共同研究をしていただいた准教授 馬場哲晃先生。温冷呈示の定量化実験と福祉利用に関する共同研究をしていただいた国立特別支援教育総合研究書教育研修部研究員 土井幸輝先生，視触覚ディスプレイを共同開発していただいた日本電子専門学校の笹田晋司先生，株式会社ジャステックの花田雅明さん，視触覚ディスプレイの基礎的な研究の支援をしていただいた東京農工大学の藤田欣也教授，東京大学名誉教授の原島博先生にはこの場をかりて感謝の意を表する。

筆者のこれまでの研究を支えていただいた家族に感謝の意を表する。

## 参考文献

### 第1章

- [1] マーシャル・マクルーハン, 後藤和彦・高儀進訳, 人間拡張の原理——メディアの理解, 竹内書店, 1967.
- [2] マーシャル・マクルーハン, メディア論1965, みすず書房, 1987.
- [3] ケヴィン・ケリー, 服部桂訳, テクニウム —テクノロジーはどこへ向かうのか?, みすず書房, 2014.
- [4] Joseph Plateau and the artist-painter J.B. Madou  
<http://www.mhsgent.ugent.be/engl-plat5.html> (2016.10.30検索)
- [5] プラクシノスコープ  
[https://ja.wikipedia.org/wiki/プラキシノスコープ#/media/File:Lanature1879\\_praxinoscope\\_reynaud.png](https://ja.wikipedia.org/wiki/プラキシノスコープ#/media/File:Lanature1879_praxinoscope_reynaud.png) (2016.10.30検索)
- [6] 連続写真撮影機  
[https://ja.wikipedia.org/wiki/エティエンヌ＝ジュール・マレー#/media/File:Fusil\\_de\\_Marey\\_p1040353.jpg](https://ja.wikipedia.org/wiki/エティエンヌ＝ジュール・マレー#/media/File:Fusil_de_Marey_p1040353.jpg) (2016.10.30検索)
- [7] マルセル・デュシャン, ピエール カバンヌ『デュシャンは語る』ちくま学芸文庫, 1999.
- [8] モルフオビジョン, <http://www.nhk.or.jp/pr/marukaji/m-giju148.html> (2016.10.30検索)
- [9] ジュリアン・メール(julien maire), Demi Pas,  
[https://www.youtube.com/watch?v=iwvpvmJE\\_M24](https://www.youtube.com/watch?v=iwvpvmJE_M24) (2016.10.30検索)
- [10] Yoichi Ochiai, Looking glass time, ACM SIGGRAPH 2014 Art Gallery, pp.406-407, 2014
- [11] 三井秀樹, インターコミュニケーション17号, NTT出版, 1996.
- [12] 山口勝弘, ロボットアバンギャルド パルコ出版, 1985.
- [13] 坂根徹夫, メディア・アート創世記 工作舎, 2010.
- [14] 森山朋絵, 映像体感ミュージアム—イマジネーションの未来へ, 東京都写真美術館, 工作舎, 2002.
- [15] 小松弘・大口孝之, インターコミュニケーション14号●特集, 映像メディアのアルケオロジ—, pp.70-80, NTT 出版, 1995.
- [16] エレキ・フータモ, メディア考古学—過去・現在・未来の対話のために, NTT出版 2015.
- [17] バーバラ・M・スタフォード 高山宏 訳, アートフル・サイエンス, 産業図書, 1997.
- [18] 港千尋, 考える皮膚 触覚文化論, 青土社, 2010.
- [19] エルンスト・マッハ, 1911 須藤吾之助, 廣松渉翻訳, 感覚の分析, 法政大学出版局, 1971.
- [20] Marcel Duchamp, *Please touch*, Breast on velvet, presented under glass. Casing for the deluxe edition of the catalog Exhibition "Surrealism in 1947", Galerie Maeght, Paris, 1947.

- [21] F.T.Marinett ,Tattilismo,11 gennaio ,1921.  
<http://www.futurismo.altervista.org/manifesti/tattilismo.htm> (2016.9.20検索)
- [22] L.モホリ=ナギ, 材料から建築, 宮島久雄訳, バウハウス選書 p.21,1928 , 1992.
- [23] 川端季雄:風合い評価の標準化と解析第 2 版,p.66, 日本繊維機械学会 ,1980.
- [24] 人肌コレクション, <http://www.techtile.org/2009/html/work.html> (2016.9.20検索)
- [25] 渡邊淳司, 加納有梨紗, 坂本真樹 “オノマトペ分布図を利用した触素材感性評価傾向の可視化”日本感性工学会論文誌 Vol. 13, No. 2, pp.353-359, 2014
- [26] ブルーノ・ムナーリけんきゅうかい, 203 触ることの意味  
<http://brunomunari.asablo.jp/blog/2006/11/13/900514> (2016.9.20検索)
- [27] 舘暲, 佐藤誠, 廣瀬通孝 監修, バーチャルリアリティ学, 日本バーチャルリアリティ学会編, 工業調査会, 2012.
- [28] 篠田裕之: 皮膚感覚インタフェースの現状と展望, 計測自動制御学会第4回システムインテグレーション部門学術講演会予稿集, pp. 412-413, 2003.
- [29] 大岡昌博, 古賀宏嗣, 宮岡徹, 三矢保永, 高密度ピンアレイ形触覚マウスによる格子状仮想テクスチャ呈示, 日本機械学会論文集 C編 71(711), pp.3174-3180, 2005.
- [30] 塩川雄太, 田蔵淳史, 昆陽雅司, 前野隆司, 超音波振動子と力覚呈示装置の統合に基づく複合触感呈示法, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集2008, "1A1-H20(1)"-"1A1-H20(4)", 2008.
- [31] 牧野泰才, 浅村直也, 篠田裕之: 吸引圧を用いるマルチプリミティブ触覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会第8回大会論文集, pp.243-244,2003.
- [32] 川田 高弘, 久米祐一郎, 曽根順治, 空気圧による力覚・触覚同時提示デバイスの検討, 日本バーチャルリアリティ学会大会第 6 回論文集, pp.143-144, 2001.
- [33] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, : 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ, 電子情報通信学会論文誌, Vol.183-D-11, No.1, pp.120-128, 2001.
- [34] 大山正, 今井省吾, 和気典二, 菊池正: 新編Part2感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, 2007.
- [35] 林政一郎, 渡邊淳司, 梶本裕之 [他], 舘, 触知覚における運動残効現象の研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 11(1), pp.69-75, 2006.-
- [36] 本間健, 井野秀一, 黒木速人, 泉隆, 伊福部達: 指先型触覚ディスプレイによって伝達される情報量, 日本バーチャルリアリティ学会第 8 回大会論文集, 2A1, 2003.
- [37] 新岡正, 伊福部達, 吉本千禎: ろうあ者用触知音像定位装置の基礎的研究, 日本音響学会誌, Vol. 33, pp. 250-258, 1977.
- [38] 仲谷正史, 寛康明, 白土寛和, 触覚をつくる-<テクタイル>という考え方, 岩波書店, 2011.
- [39] 串山久美子, メディアアートとテーブル型システム, ヒューマンインタフェース学会誌, Vol.9 No.1, pp.44-47, 2007
- [40] Myron W. Krueger, <http://dada.compart-bremen.de/item/agent/527> (2016.11.20 検索)
- [41] 岩井俊雄, テーブルの上の音楽, Composition on the Table, 1999

- <http://www.ntticc.or.jp/ja/archive/works/composition-on-the-table/> (2016.11.20 検索)
- [42] 藤幡正樹, ビヨンド. ページズ, Beyond Pages,  
[http://www.ntticc.or.jp/ja/feature/2005/art\\_meets\\_media/Works/work02\\_j.html](http://www.ntticc.or.jp/ja/feature/2005/art_meets_media/Works/work02_j.html) (2016.11.20 検索)
- [43] Kumiko Kushiyama, Hide-and-Seek  
<https://www.siggraph.org/artdesign/gallery/S00/interactive/thumbnail12.html> (2016.11.20 検索)
- [44] minim++ KAGE <http://www.plaplax.com/legacy/artwork/minim++/artwork/kage-e.html> (2016.11.20 検索)
- [45] 石井裕+タンジブル・メディアグループ/ タンジブル・ビット-情報の官職情報の気配, NTT コミュニケーションセンター, NTT出版, 2000.
- [46] 笥康明, 苗村健, 松下光範, Tablescae Plus  
<http://www.xlab.sfc.keio.ac.jp/~kakehi/?works=tablescape-animation> (2016.11.20 検索)
- [47] 河口洋一郎, Gemotion: 凹凸 Life Skin  
<http://individuals.iii.u-tokyo.ac.jp/~yoichiro/works/works1.htm> (2016.11.20 検索)
- [48] Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Fumitaka Nakaizumi, Ryo Kawamura., Project FEELEX: adding haptic surface to graphics, Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '01, New York, NY, USA, ACM, pp.469-476 (online), ,2001.
- [49] Dave Boothroyd, Touch, Time and Technics : Levinas and the Ethics of Haptic Communications, Theory, Culture & Society march/May 2009, 26, pp.330-345 (日本語訳: ディブ・ブースロイド, 触覚, 時間, 技術—レヴィナス, または触覚的コミュニケーションの倫理, pp.157-182, メディア表象, 東京大学出版会, 2015)
- [50] J.J.Gibson: Observations on active touch, Psychological Review, Vol.69, No.6, pp.477-491, 1962.
- [51] S. J. Lederman & R. L. Klatzky.: Hand movements: A window into haptic object recognition, Cognitive psychology, Vol.19, No.3, pp.342-368, 1987.

## 第2章

- [52] 総務省, 五感情報通信技術に関する調査研究会報告書,  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/policyreports/chousa/gokan/pdf/060922\\_2.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/gokan/pdf/060922_2.pdf), (2015.10.20 検索)
- [53] Lynette A.Jones, Warm or Cool, Large or Small? The Challenge of Thermal Displays, IEEE Transactions on Haptics Vol. 1 No. 1, pp. 53-70, 2008.
- [54] 串山久美子, 感覚デバイス開発 機器が担うヒト感覚の生成・拡張・代替技術, 第7章 温・冷デバイスの要求・制約条件, 株式会社エヌ・ティー・エス P.299-307, 2014
- [55] Y.Zotterman : Special senses: thermal receptors. Ann Rev Physiol 15 : 357-372, 1953.

- [56] H.Rein.: Über die Topographie der Warmempfindung. Beziehungen zwischen Innervation und Receptorischen Endorganen, Zeitschrift für Biologie, 82, pp. 513-535, 1925.
- [57] H.Strughold, R.Porz,: Die Dichte der Kaltpunkte auf der Haut des Menschlichen Körpers, Zeitschrift für Biologie, 91, pp. 563-571, 1931.
- [58] D. Yarnitsky and J.L. Ochoa, "Warm and Cold Specific Somato- sensory Systems," Brain, Vol. 114, pp. 1819-1826, 1991.
- [59] D.R. Kenshalo , The cutaneous senses. Killing JW and Riggs LA (Eds.): Woodworth and Schlosberg's Experimental Psychology: Sensation and Perception, 1: pp.117 168, 1972.
- [60] J.C. Stevens and K.K. Choo ,Temperature sensitivity of the body surface over the lifespan. Somatosensory and Motor Research, 15(1): pp.13 28, 1998.
- [61] D.R. Kenshalo, C.E. Homes, and P.B. Wood: Warm and Cool Thresholds as a Function of Rate of Stimulus Temperature Change , Perception & Psychophysics,Vol. 3,pp.81-84 ,1968.
- [62] S.L. Berg: Magnitude Estimates of Spatial Summation for Conducted Cool Stimuli along with Thermal Fractionation and a Case of Secondary Hyperalgesia,PhD dissertation,Florida State Univ. ,1978.
- [63] 大原淳 ,加藤寛士 ,橋本悠希 ,梶本裕之, 温度によって生じるファントムセンセーション , 日本バーチャルリアリティ学会大会第14回論文集,2009.
- [64] B.G. Green, "Localization of Thermal Sensation: An Illusion and Synthetic Heat," Perception & Psychophysics, Vol. 22, pp. 331-337, 1977.
- [65] W.M. Bergmann Tiest and A.M.L. Kappers, "Thermosensory Reversal Effect Quantified," Acta Psychologica, Vol. 127, pp.46-50, 2008.
- [66] L.E. Williams and J.A. Bargh: Experiencing Physical Warmth Promotes Interpersonal Warmth,SCIENCE, Vol. 32,pp.606-607 ,2008.
- [67] A. Auliciems, Towards a Psycho-Physiological Model of Thermal Perception, Int. j. Biometeor., Vol. 25, No.2, pp.109-122, 1981.
- [68] 内田幸子, 田村照子 : 高齢者の皮膚における温度感受性の部位差, 日本家政学会, 58, pp.579-587, 2007
- [69] Mower,G.D.: Perceived intensity of peripheral thermal stimuli is independent of internal bodytemperature, Journal of Comparative and Physiology and Psychology, Dec:90(12), pp.1152-1155. 1976
- [70] ペルティエ素子 <http://ja.wikipedia.org/wiki/ペルティエ素子> (2016年 3 月2日検索)
- [71] 秋山史門,佐藤克成,牧野泰才,前野隆司 : ヒトの温度知覚特性を利用した温度呈示手法の検討, 日本バーチャルリアリティ学会第16回大会論文集, pp.31-32, 2011.
- [72] 佐藤克成,前野隆司, 温・冷刺激の空間分割による高応答性温度提示ユニット , 情報処理学会インタラクシオン2012 pp.923-928, 2012.

- [73] 佐藤克成, 篠田裕之, 舘暲: 遠隔物体の形状 と温度の知覚が可能な力触覚情報伝達システム, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomec2011),2P1-O03 ,2011.
- [74] J. Citerin, A. Pocheville, and A. Kheddar, “A Touch Rendering Device in a Virtual Environment with Kinesthetic and Thermal Feedback,” Proc. IEEE Int’l Conf. Robotics and Automation (ICRA ’06), pp.3923-3928, 2006.
- [75] M. Benali-Khoudja, M. Hafez, J.M. Alexandre, J. Benachour, and A. Kheddar, “Thermal Feedback Model for Virtual Reality,” Proc. Int’l Symp. Micromechatronics and Human Science (MHS ’03), pp.153-158, 2003.
- [76] A. Yamamoto, B. Cros, H. Hasegimoto, and T. Higuchi: Control of Thermal Tactile Display Based on Prediction of Contact Temperature,Proc. IEEE Int’l Conf. Robotics and Automation (ICRA ’04), pp.1536-1541 ,2004.
- [77] 井野秀一, 泉隆, 高橋誠, 伊福部達: 物体接触時の皮膚温度変化に着目した材質触覚ディスプレイ方式の提案ー感覚フィードバック型ハンドのための基礎的研究ー, 計測自動制御学会論文集, 30, 3, pp.345-351, 1994.
- [78] 高山裕行, 山本晃生, 樋口俊郎: 物体表面における濡れ感の再現提示に関する基礎的検討, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集(CD-ROM) 1P1-I14, 2008.
- [79] 池井寧, 池野晃久, 福田収一: 振動形触覚ディスプレイに関する研究, ヒューマンインタフェース学会誌, Vol.9, No.3,pp.261-266, 1994.
- [80] 渡辺亮, 大原淳, 國安裕生, 佐藤未知, 福嶋政期, 梶本裕之: 前腕部への触刺激に対する温度感覚の重畳,日本バーチャルリアリティ学会第 16 回大会論文集p.23-24, 2011
- [81] 小林孝浩,福森みか: 温度覚による触図表現の拡張「温感触図」日本バーチャルリアリティ学会第 16 回大会論文集p.185-186,2011.
- [82] Mutsuhiro Nakashige, Minoru Kobayashi, Yuriko Suzuki, Hidekazu Tamaki, and Suguru Higashino. "hiya-atsu" media: augmenting digital media with temperature. In CHI '09: Proceedings of the 27th international conference extended abstracts on Human factors in computing systems, pp. 3181-3186, NY, USA, 2009.
- [83] 宮下芳明, 西本一志, 温度で制約を緩やかに提示するシステム Thermoscore を用いた即興演奏支援, 情報処理学会研究報告: ヒューマンインタフェース研究会報告, Vol. 2004, No. 90, pp. 13-18 ,2004.
- [84] 鳴海拓志, 赤川智洋, ソン・ヨンア, 谷川智洋, 桐山孝司, 廣瀬通孝, 「Thermotaxis : 冷温感覚の提示による行動誘導」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.15, No.3, pp.347-356 ,2010.
- [85] 串山久美子, メディアアートの回廊, メディアアート紀行,映像情報メディア学会 学会誌 Vol.65, No.9 ,pp.63-67 ,2011
- [86] 串山久美子, インタラクティブアート, CG入門, 河口洋一郎編集, 丸善出版,pp.46-61,200
- [87] Kumiko Kushiya, Transparent Blue,ArtGallery SIGGRAPH 2005 A Publication of

- ACM SIGGRAPH/ACM SIGGRAPH 2005 Electronic Art and Animation Catalog, Pages 96-97, 2005  
<http://www.siggraph.org/artdesign/gallery/S05/index.html>(2016.11.20 検索)
- [88] Kumiko Kushiyama, Touch the Drop, ArtGallery SIGGRAPH 2005 A Publication of ACM SIGGRAPH, SIGGRAPH '04 ACM SIGGRAPH 2004 Art gallery, Page 60,  
<http://www.siggraph.org/artdesign/gallery/S04/index1.html>(2016.11.20 検索)
- [89] Kumiko Kushiyama, Waves\_H, ArtGallery SIGGRAPH 2003 A Publication of ACM SIGGRAPH, SIGGRAPH 2003 Art gallery,  
<http://www.siggraph.org/artdesign/gallery/S03/3d/0181.html> (2016.11.20 検索)
- [90] Kumiko Kushiyama 「Thermoesthesia」 ArtGallery SIGGRAPH 2006 A Publication of ACM SIGGRAPH, SIGGRAPH '06 ACM SIGGRAPH 2006 Art gallery, Article No. 71, 2006.
- [91] 坂田亮：熱電交換，裳華房出版，2005.
- [92] Ukichiro Nakaya. , Snow Crystals-natural and artificial Harvard University publication society, 1954.
- [93] Kenneth G. Libbrecht, Snow Crystals ,  
<http://www.snowcrystals.com/guide/guide.html>(2016.11.20 検索)
- [94] Kumiko Kushiyama, Shinji Sasada 「Thermoesthesia」 Ars Electoronica 2006 Center pp.354-356, A Publication of HATJE CANTZA 2006.
- [95] Kumiko Kushiyama, Shinji Sasada 「Thermoesthesia」 Art Gallery Laval Virtual 2007 A Publication of Laval Virtual 2007 , 2007.

### 第3章

- [96] 土井幸輝，西村崇宏，瀬尾明彦，串山久美子，馬場哲晃：ヒト手掌部における温度感覚特性及び識別特性の評価，日本感性工学会論文誌，Vol.11, No.3, pp.419-425, 2012.
- [97] J.P. ギルホード／著，秋重義治／監訳：精神測定法，pp.276-301, 1976.
- [98] ISO13732-1: Ergonomics of The Thermal Environment- Methods for The Assessment of Human Responses to Contact with Surfaces (Part1: Hot Surfaces), 2006.
- [99] ISO13732-3: Ergonomics of The Thermal Environment- Methods for The Assessment of Human Responses to Contact with Surfaces (Part3: Cold Surfaces), 2005.
- [100] 織田揮準：日本語の程度量表現用語に関する研究，教育心理学研究，18, pp. 166-176, 1970.
- [101] Mower, G.D.: Perceived Intensity of Peripheral Thermal Stimuli is Independent of Internal Body Temperature, Journal of Comparative and Physiological Psychology, 90, pp.1152-1155, 1976.
- [102] A.J.H. Vendrik and E.G. Eijkman: Psychophysical Properties Determined with Internal Noise, The Skin Senses, D.R. Kenshalo, ed., pp.178-193, Charles Thomas , 1968.



- [103] P.W. Nathan and R.C. Rice, The Localization of Warm Stimuli, *Neurology*, Vol. 16, pp. 533-540, 1966.
- [104] Beste, R, Hensel, H.: Subjective Estimation of Static Temperatures at The Palm in Humans, *Pflügers Archiv*, 368, R47, 1977.
- [105] Thunberg T., Förnimmelserne vid till samma ställe lokaliserad, samtidigt pågående köld-och värmeretning. Uppsala Läkfören Förh.: pp.489-95., 1896
- [106] Craig AD, Bushnell MC. The thermal grill illusion: unmasking the burn of cold pain. *Science*.; 265:pp.252-5. 1994.
- [107] Defrin R, Ohry A, Blumen N, Urca G. Sensory determinants of thermal pain. *Brain*.; 125: pp.501-10., 2002.
- [108] Kumiko Kushiyama, Tetsuaki Baba, Kouki Doi, and Shinji Sasada. "Thermo-Paradox"-Thermal Design Display device to use the thermal tactile illusions, *ASIAGRAPH2010 in Tokyo*, Journal Vol.5 No.1 2010, pp.136-137 2010.
- [109] Kumiko Kushiyama, Tetsuaki Baba, Kouki Doi, and Shinji Sasada. 2010. Thermal design display device to use the thermal tactile illusions: "Thermo-Paradox". In *ACM SIGGRAPH 2010 Posters (SIGGRAPH '10)*. ACM, New York, NY, USA, , Article 99, 1 pages, 2010.
- [110] 串山久美子, 土井 幸輝, 笹田 晋司, 馬場 哲晃, Thermo Drawing: 冷温提示による小型触覚ディスプレイを使用した 温度描画システムの開発, *インタラクシオン 2012*, 情報処理学会, 2012-3
- [111] Kensuke Takada, Kyoko Higurashi, Tatsuhiko Suzuki, Misako Ota, Tetsuaki Baba, Kumiko Kushiyama, Temperature Design Display device to use Peltier elements and liquid crystal thermograph sheet Thermo-Pict. In *ACM SIGGRAPH 2009 Posters. SIGGRAPH'09*. ACM Press, Article No. 27, 2009.
- [112] Kumiko Kushiyama, Tetsuaki Baba, Kouki Doi, and Shinji Sasada. 2010. Temperature design display device to use peltier elements and liquid crystal thermograph sheet: "Thermo-Pict neo". In *ACM SIGGRAPH 2010 Posters (SIGGRAPH '10)*. ACM, New York, NY, USA, Article 42, 1 page., 2010.

## 第 4 章

- [113] 馬場哲晃, 笠松慶子, 土井幸輝, 串山久美子, 温冷提示を利用したビデオゲームインタラク ションにおける手法の検討と開発, *情報処理学会論文誌, 一般社団法人情報処理学会*, Vol.53, No.3, pp.1082-1091, 2012.
- [114] Kumiko Kushiyama, Thermo-Chair -Development of a tactile furniture for thermal sensation, *ASIAGRAPH2010 in Shanghai*, Journal Vol.4 No.1 2010, pp.199-200 2010.

- [115] Rika Shoji, Tetsuaki Baba, Kumiko Kushiyma, Relationship of Thermo and Emotions --- Evaluation Experiments for expression emotions by use of a Handmake thermo device. In Asiagraph2011 poster, Vol. 5, No.1, pp.85-86 2011.

## 第 5 章

- [116] 笠間浩幸,子どもの遊び環境としての<砂場>:砂遊びから見る子どもの発達と<砂場>の役割, 環境教育研究 1(1), pp.113-124, 1998.
- [117] 河合隼雄『箱庭療法入門』,誠信書房, 1969.
- [118] 早川智彦 松井茂 渡邊淳司,オノマトペを利用した触り心地の分類手法 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.15, No.3, pp. 487-490, 2010.
- [119] 白土寛和 前野隆司, 触感呈示・検出のための材質認識機構のモデル化, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.9 No.3 pp.235-240, 2004.
- [120] Kumiko Kushiya, Shinji Sasada 「Magnetsphere」 Poster SIGGRAPH 2007,Sketch,Conference CD A Publication of ACM SIGGRAPH, Article No. 45, 2007.
- [121] Jean-Pierre Hebert,Bruce Shapiro,Denny Bollay,David Bothman,Scott Masch : Sisyphus and Ulysses:Art Gallery,SIGGRAPH1999, 1999.
- [122] Davide Boriani,Superficie Magnetica  
[http://www.museomaga.it/collezione/37/Superficie\\_magnetica](http://www.museomaga.it/collezione/37/Superficie_magnetica)(2016 年 9 月検索)
- [123] David Durlach ,the Dancing Iron Dust,  
<http://www.technofrolics.com/about/>(2016 年 9 月検索)
- [124] ShunsukeYoshida,Jun Kurumisawa,Haruo Noma,Nobyji Tetsutani,Kenichi Hosaka, Sumi-nagashi: creation of new style media art with haptic digital colors, MULTIMEDIA'04, Proceedings of the 12th annual ACM international conference on Multimedia,pp. 636-643 New York, NY, USA, 2004,
- [125] Gian Pangaro, Dan Maynes-Aminzade, and Hiroshi Ishii. 2002. The actuated workbench: computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces. In Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '02). ACM, New York, NY, USA, pp.181-190.,2002.
- [126] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. 2013. inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '13). ACM, New York, NY, USA, pp.417-426, 2013.
- [127] Takaharu Kanai, Yuya Kikukawa, Tatsuhiko Suzuki, Tetsuaki Baba, and Kumiko Kushiya. PocoPoco: a tangible device that allows users to play dynamic tactile interaction. In ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies (SIGGRAPH '11). ACM, New York, NY, USA, , Article 12, 1 page.2011
- [128] H Ishii, C Ratti, B Piper, Y Wang, A Biderman and E Ben-Joseph Bringing clay and

- sand into digital design — continuous tangible user interface, *BT Technology Journal* 1.22, No.4, pp.287-299, 2004.
- [129] Yasushi Matoba, Yoichi Takahashi, Taro Tokui, Shin Phuong, Shingo Yamano, Hideki Koike, AquaTop display: a true "immersive" water display system, *SIGGRAPH '13: ACM SIGGRAPH 2013 Emerging Technologies*, 2013.
- [130] Yoichi Ochiai, Takayuki Hoshi, Jun Rekimoto, Pixie dust: graphics generated by levitated and animated objects in computational acoustic-potential field, *SIGGRAPH '14: ACM SIGGRAPH 2014 Posters*, 2014.
- [131] 小木哲朗, 没入型ディスプレイの特性と応用の展開, ヒューマンインタフェース学会論文誌 1(4), pp.43-49, 1999.
- [132] Kumiko Kushiya, Yuya Kikukawa, Tetsuaki Baba, Paul Haimes, and Shinji Sasada. 2014. Mag-B: tactile sand play using an interactive magnetic display. In *ACM SIGGRAPH 2014 Studio (SIGGRAPH '14)* ACM, New York, NY, USA, , Article 39 , 1 pages., 2014

## 第 6 章

- [133] Kumiko Kushiya, Shinji Sasada 「Fur-Fly」 Art Gallery *ACM SIGGRAPH2009* ,Leonardo Journal August , 2009.
- [134] 串山久美子, 笹田晋司, 生物感覚を提示する毛状視触覚ディスプレイ 「Fur-Fly」 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.15 No.3 pp.459-462 ,2010.
- [135] メレット・オッペンハイムのオブジェ  
<http://gensoh.web.fc2.com/jimmei/oppenheim.html> ((2016 年 10 月 30 日検索))
- [136] レベッカホルン 東京都現代美術館, 淡交社, 2009.
- [137] 展覧会「身体と表現 1920-1980 ポンビドゥーセンター所蔵作品から」東京国立近代美術館,1996.
- [138] ナム・ジュン・パイク, フィード・バック&フィード・フォース,ワタリウム美術館, 1993.
- [139] Y.Kawaguchi[Gemotion Screen] *ACM SIGGRAPH2002 Art Gallery*,2002.
- [140] D.Leithinger, and H.Ishii.: Relief: a scalable actuated shape display, *Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction, TEI '10*, New York, NY, USA, ACM, pp.221-222(online),2010.
- [141] M.Blackshaw, A.DeVincenzi, D.Lakatos, D.Leithinger, and H.Ishii,:  
Recompose:direct and gestural interaction with an actuated surface, *Proceedings of the 2011 annual conference extended abstracts on Human factors in computing systems, CHI EA '11*, New York, NY, USA, ACM, pp.1237-1242 (online), 44,2011.
- [142] I.Poupyrev, T.Nashida. and M.Okabe: Actuation and tangible user interfaces: the Vaucanson duck, robots, and shape displays, *Proceedings of the 1st international*

- conference on Tangible and embedded interaction, TEI '07, New York, NY, USA, ACM, pp.205-212, (online), 2007.
- [143] M.Nakatani, H.Kajimoto, D.Sekiguchi, N.Kawakami. and S.Tachi, Pop Up!: a novel technology of shape display of 3D objects, ACM SIGGRAPH 2004 Emerging technologies, SIGGRAPH '04, New York, NY, USA, ACM, pp.21(online), 2004.
- [144] Kumiko Ryokai, Stefan Marti, Hiroshi Ishii, I/O Brush: Drawing with Everyday Objects as Ink, CHI 2004, 2004.
- [145] S.Saga, S. Kuroki, N.Kawakami, and S.Tachi. Fibratus tactile sensor using reflection on an optical lever. ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies, 2007.
- [146] 上間祐二, 古川生紘, 常盤拓司, 杉本麻樹, 稲見昌彦: モディスプレイ, 第14回バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2009.
- [147] 中島康祐, 伊藤雄一, 山抱加奈, 吉田愛, 高嶋和毅, 北村喜文, 岸野文郎, FuSA2 Touch Display: 光ファイバーを用いた毛状マルチタッチディスプレイ, インタクション2010, 2010.
- [148] Kumiko Kushiya, Tyou Ikei, Shinji Sasada 「Tactile Glass landscape」 Poster SIGGRAPH 2008 Sketch, Conference CD A Publication of ACM SIGGRAPH Article No. 39, 2008.
- [149] Kumiko Kushiya, Shinji Sasada 「Tactile Cloud landscape」 Art Gallery SIGGRAPH ASIA 2008 A Publication of ACM SIGGRAPH SIGGRAPH Asia '08 ACM SIGGRAPH ASIA 2008 artgallery: emerging technologies, Pages 21-21, 2008.
- [150] 点字ディスプレイ ドットビュー, ケーゲーエス株式会社  
<https://www.kgs-jpn.co.jp/index.php?製品詳細> (2016年10月30日検索)
- [151] Yuriko Suzuki, Minoru Kobayashi, Akira Nakayama, Satoshi Iwaki: Untethered Force Feedback Interface That Uses Air Jets: Emerging Technologies : SIGGRAPH 2004 Page 30, 2004.
- [152] Kumiko Kushiya : Design of a Tactile sense display for “Snoezlen” space construction-Interactive work ‘Fur-Fly’, ASIAGRAPH 2009 in Tokyo, pp.11-14, 2009-

## 第7章

- [153] 発明人: 串山久美子, 特願 2006-197419 号 出願日: 2006/07/19 国際特許出願 申請 2007/7/19 PCT/JP2007/64226 国内特許公開 4171771 号 2008-525895 「ディスプレイ」
- [154] 発明人: 串山久美子, 馬場哲晃, 土井幸輝, 特願 2010-42179 号 出願日: 2010/2/26 「冷温感覚ディスプレイ装置及びその駆動方法」
- [155] 発明人: 串山久美子 特願 2009-82669 号 出願日: 2009/3/30 「直動-揺動用駆動装置及