

温冷呈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

馬場 哲晃^{1,a)} 笠松 慶子¹ 土井 幸輝² 串山 久美子¹

受付日 2011年6月17日, 採録日 2011年12月16日

概要: 著者らはこれまでペルチェ素子を利用した温冷呈示インタラクションを提案してきた。本稿では温冷呈示インタラクションをビデオゲームに応用するための基礎的な実験と、開発したアプリケーション事例に関して述べる。温冷感覚は皮膚感覚の一部として位置づけられる。振動モータを利用したゲームインタフェースは皮膚感覚呈示が可能なゲームコントローラとして一般的である一方で、温冷感覚呈示等の他の皮膚感覚呈示を利用したゲームコントローラ事例はあまり例をみない。そこで著者らは制作した温冷呈示ゲームコントローラを利用して、温冷呈示における出力条件下を 60, 80, 100% としてユーザの反応速度に関する実験を行った。結果として、反応速度に関する具体的な数値を得られたほか、ペルチェ素子の温度変化量とユーザの反応速度に関連があることを示せた。これらの結果を利用して、実際に 2 種類のゲームと 1 種類のミニゲームからなるアプリケーションを作成し、プレイ中のユーザの観察結果をまとめた。

キーワード: インタフェース, 温冷感覚, ビデオゲーム, ゲームコントローラ, ゲーム設計

Development and Evaluation of a Video Game Interaction that Offers Thermal Sensation to Users

TETSUAKI BABA^{1,a)} KEIKO KASAMATSU¹ KOUKI DOI² KUMIKO KUSHIYAMA¹

Received: June 17, 2011, Accepted: December 16, 2011

Abstract: We have been continuing study about thermal sensation interaction with peltier modules. In this paper we shall apply the techniques of interaction to a video game. It is major to use a vibration motor for tactile sensation in video game interactions. But there are few studies for applying thermal sensation to a video game. Then we experimented with response time of users under the condition 100, 80, 60%-output of our prototype controller device. As a result, we found there is a relation of response time and temperature change speed, and a concrete numerical parameter of a peltier element for a video game interaction. Based on above result of the experiment, we made video games that offer thermal sensation to users, and describe user's reactions.

Keywords: interface, thermal sensation, video game, game controller, game design

1. はじめに

温冷呈示は、「熱い」、「冷たい」の二値だけでなく、その中間領域も段階的にユーザに呈示可能であるほか、呈示位置

や温度変化速度等の組合せによって多くの情報をユーザに伝えることが期待できる。VR 分野ではバーチャルウォークスルーやゲーム、コミュニケーション等に、CHI 分野ではユーザ支援やユーザビリティ向上のために利用されてきた事例がある。これらの研究の多くには温冷呈示装置としてペルチェ素子が利用されている。著者らも VR 分野や芸術分野においてペルチェ素子を利用した温冷呈示インタラクションを提案してきた [1], [2], [3], [4], [5]。

心理・生理学分野においては、Kenshalo らがペルチェ素

¹ 首都大学東京大学院システムデザイン研究科
Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan
University, Hino, Tokyo 191-0065, Japan

² 国立特別支援教育総合研究所
National Institute of Special Needs Education, Yokosuka,
Kanagawa 239-8585, Japan

a) baba@sd.tmu.ac.jp

子を利用したユーザの温冷感覚閾値に関する調査を報告している [6]。その後ペルチェ素子を利用した定量的な実験手法の提案により [7], 1970 年代後半から人間の温冷感覚閾値に関する基礎的な実験がされてきた。Yarnitsky らは温冷感覚における反応時間が温度変化速度に依存しないことを述べている [8] ほか, 冷感呈示で擬似的な温熱痛を与えられることも報告している [9]。また, 温冷呈示にはユーザに直接温冷部を接触させるほか, 室内温度変化, 温風, 冷風を利用する間接的手法も考えられる。これについては, 快・不快に関する基礎的知見が Auliciems [10] によって述べられている。

これまで CHI, VR 分野において, 温冷覚呈示インタラクションは取り上げられてきたが, 消費電力や温冷呈示箇所, ユーザへの呈示面積によって, ユーザ反応時間や温冷効果を調整できたため, 上記心理・生理学分野における基礎的知見を積極的に活かしているとはいえなかった。本研究ではゲームコントローラへの実装を考慮した場合, 消費電力 (省電力化), 排熱といったデバイスの制約, 温冷呈示箇所の選定・決定, ビデオゲーム特性とインタラクションの関係を考慮に入れ, これまでの基礎的知見を利用した設計指針が必要となる。そこで制作したゲームコントローラを利用して実験を行い, 温度変化速度と反応時間の観点から考察を行い, 温冷呈示ゲームインタラクションにおける基礎的な知見をまとめる。すでに Yarnitsky らによって, 実験条件下においては, 閾値温度に達してからのユーザ反応時間が温度変化速度に依存しないことが報告されているが, 本研究ではペルチェ素子を駆動してからの反応時間を基準とすることや, Yarnitsky らの装置 (温冷呈示サイズは $25 \times 50 \text{ mm}$) に比べ, 温冷呈示サイズを $15 \times 15 \text{ mm}$ とし, 呈示部分を手掌部に限定する点で考察が異なる。

本稿では温冷呈示をビデオゲームインタフェースに利用する。ゲームコントローラにおけるインタフェース事例はこれまで製品や研究領域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。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, ゲーム側の出力は視聴覚を利用したものが多く, 触覚を利用した出力装置には振動モータを利用した触覚呈示以外にはあまり事例がみられない。

ビデオゲームにおいて, 30/60 fps の画面更新速度に遅れることなくペルチェ素子を駆動させることは, その特性から考慮して非常に困難である。そこで本稿で扱うビデオゲームインタラクションでは応答即時性を求める設計ではなく, 温冷呈示速度の遅さがある程度無視できるような設計を検討する。つまり, 水の中に入ると冷たい, 火の中に入ると熱いといった単純なものや, 熱いまたは冷たい場所を探す等の即時性を必要としないインタラクションであれ

ば, ある程度の利用効果を期待できると考えた。一方で, 一般的なゲームコントローラへの実装を考慮して, 電力消費や, 形状, 温冷呈示位置に関する実験, 検討を行うことで, 温冷呈示ビデオゲームシステムにおける基礎的な設計指針をまとめる。

温冷感覚をユーザに呈示するために, 特別なデバイスをユーザに装着させるのはユーザビリティの面から好ましくない。そこで一般的なゲームコントローラ形状に温冷呈示機能を付加させる設計とした。本稿では一般的と思われる十字ボタンと A, B ボタンを備えるゲームコントローラの形状をまずは参考にし, そのデバイス側面に温冷呈示機能を付加することとした。

2. 関連研究

本研究では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を扱う。そこで皮膚感覚呈示を行うゲームコントローラと, 温度感覚呈示の 2 つの視点から関連研究を調査した。

皮膚感覚呈示可能なゲームコントローラでは振動モータを利用した触覚呈示が一般的である。皮膚感覚には触覚のほか, 痛覚や温度感覚があり, 痛覚に関しては Morawe ら [11] によるアートワーク「PainStation」があげられる。このほか, 風を利用した皮膚感覚呈示装置として Miyashita らによる風覚ディスプレイ [12] や, Sawada らによる ByuByuByu [13] では, 制作したデバイスを利用したゲームコンテンツの提案を行っている。しかしゲームデバイスの中に温度呈示を応用した事例はあまり例をみない。

CHI 分野においては温冷呈示をポインティングデバイス [14], 即興演奏支援 [15], 遠隔地間コミュニケーション [16], 空間ナビゲーション装置 [17] に応用した事例がある。これらはユーザに対して温冷呈示をユーザ同士のコミュニケーションやユーザ支援, ユーザビリティ向上のために利用している。VR 分野においては, Dionisio [18] は, バーチャルウォークスルーシステムにておいて, ペルチェ素子や送風機等を利用したバーチャル空間内での触覚呈示システムを提案している。このシステムはバーチャル上での温冷感イベントを現実世界に呈示する意味で本研究に類似している。このほか, 著者らが研究してきた芸術表現応用 [1] 等がみられる。これらに対し, 本研究では, より具体的な制約 (デバイス消費電力, 温冷呈示部位, ビデオゲームインタラクションとの整合性) において, アプリケーション提案を行う。実際のゲームデバイスで温冷呈示を利用する場合, 消費電力は少ないほうが好ましく, 最小の温度変化でユーザに適切な温度情報を提供できなければならない。また, デバイス形状を操作性の高い一般的なゲームコントローラ形状にした場合, ユーザのどの部位に触れるのが好ましいか検討する必要がある。さらに, ペルチェ素子の温度変化速度が即時性の高いゲームコントローラに対

してそもそも有効に機能するのも十分に検討しなければならない。

これまで述べているとおり，温冷呈示情報を即時的にユーザに提供することは難しく，Murai ら [19] や，坂口 ら [20] は高速な温度制御が可能なデバイスを提案したが，その場合においても，ビデオゲームにおける 30 fps/60 fps に対応可能な応答速度とはいえない．高速な温冷呈示を行う場合は，十分な冷却機構が必要であり，一般的には大きなヒートシンクを利用しなければならない．これをゲームコントローラの中に実装することは現実的ではない．以上をふまえ，ゲームコントローラにペルチェ素子を利用した温冷呈示機能を実装するためには，「ユーザ反応速度の遅延」と「熱処理」の2つの問題を解決する必要がある．本稿ではこれらの問題を，熱処理に関しては消費電力量の最適化，ユーザ反応速度の遅延に関しては実験から具体的な数値検討を行い，基礎的な知見を得ることで解決を試みる．

本研究では実際のゲームコントローラへの応用を優先し，その温冷呈示モジュールをゲームコントローラに実装可能なサイズとする．さらに最小の電力で効果的な温冷呈示が可能な出力値を探る．消費電力を減らすことでペルチェ素子の温度変化速度は鈍り，それにともないユーザの反応時間が遅くなることが予想される．そこで温冷呈示可能なゲームコントローラを制作，利用して実験を行うことで，その反応速度変化を考察し，どのようなゲームが展開可能か，具体的な制作事例とともに提案する．

3. デバイスの設計

3.1 温冷呈示位置

温・冷点は体の各部位に存在する．冷点密度に関しては Strughold ら [21]，温点密度に関しては Rein [22] による報告がある．図 1 は手掌部の冷点を黒点で示している．また上記報告より手掌部における冷点と温点密度を比較すると，冷点の数が大きいことが分かっている．図 1 からユーザの冷点は指先よりも手掌部の方が多いことが分かる．そこでゲームコントローラを握る際，ユーザの手掌が自然とゲームコントローラに触れることを考慮した結果，ペル

チェ素子をゲームコントローラ側面に配し，温冷覚呈示位置をユーザの手掌に限定した．

3.2 ゲームコントローラ仕様

制作したゲームコントローラ外観を図 2 に示す．ユーザに温冷呈示する仕組みにはペルチェ素子を用いる．デザイン外観，ユーザビリティを損なわないためにペルチェ素子は大きすぎず，従来のゲームコントローラデザインに自然に実装可能なものが好ましい．そこで 15 mm 角，厚みが 3.8 mm のペルチェ素子をゲームコントローラ左右側面に 1 つずつ配した．プロトタイプ成形には 3D プリンタ (Stratasys 社製 Dimension 1200es) を用いた．

ゲーム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．ゲームコントローラは UART 通信で PC に接続され，ゲームの状況に応じて側面 2 枚のペルチェ素子が駆動される仕組みである．ペルチェ素子を駆動するためのメッセージは 3 Byte から構成され，それらを PC 側で操作することでそれぞれ 2 枚のペルチェ素子を独立に制御でき，駆動出力を 0~100 の範囲で PWM 制御できる．今回利用したペルチェ素子の最大駆動電力量は表 1 から 7.3 W であり，その 80% 以下である



図 1 ヒトの皮膚上に分布する冷刺激を感じ取るといわれている冷点分布の様子

Fig. 1 The topography of cold-scores points at the inside of the hand.



図 2 左：ゲームコントローラ前面，中央：ゲームコントローラ背面，右：側面に配したペルチェ素子

Fig. 2 Left: Front of the controller. Center: Rear of the controller. right: A peltier element putted on the side of the controller.

表 1 試作したゲームコントローラの仕様
Table 1 Details of the prototype controller.

寸法・重量	120 × 55 × 20 (W × D × H) mm · 482 g
材質	ABS 樹脂
マイクロコントローラ	PIC 16F88
使用トランジスタ	Toshiba 製 TA7267BP
ペルチェ製造メーカー・型番	フジタカ・FPH1-3103NC
ペルチェ寸法	寸法 15 × 15 × 3.8 (W × D × H) mm
ペルチェ規格	最大電力 7.3 W
ペルチェ制御チャンネル数	2
ペルチェ駆動方式	PWM 方式
PC との通信方式	UART, 9,600 bps
駆動電流量	0~2.4 A
使用電力	11.6 W (最大)

5.8 W 程度を 100%出力として設計した。ペルチェ素子をゲームコントローラ側面に 1 枚ずつ利用しているため、最大出力時で計 11.6 W 程度の電力が必要となる。

3.3 冷却機構

ゲームコントローラ背面をスリット状にし、ペルチェ素子およ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。通常はヒートシンクを利用するのが適切であるが、今回は駆動電力が少ないこと、つねに温冷呈示はしないこと、ゲームコントローラの大型化を避けることの 3 点を考慮し、簡易的な冷却装置とした。しかし長時間ゲームを楽しむことでペルチェ素子やトランジスタが高熱になることがありうるため、ペルチェ素子を 20 秒以上連続で駆動させないソフトウェア安全装置を実装した。ただし 20 秒以内に駆動メッセージを再度受信した場合はその動作範囲内ではない。さらにトランジスタ自体にも過剰な出力時には動作が停止する安全装置が実装されている。制作したゲームコントローラの仕様を表 1 に示す。

4. 温冷呈示におけるユーザの反応時間に関する予備実験

Yarnitsky ら [8] は 25 × 50 mm サイズのペルチェ機構で構成された装置で、15 人の被験者に対し、ユーザの温冷感閾値に関する実験を行うと同時に、その反応時間に関する考察を述べている。そこにおいて、温度変化速度はユーザの反応時間に影響しないことを報告した。ただしここでの反応時間とは、ペルチェ素子を駆動し始めてからではなく、呈示温度が閾値に達してから被験者がスイッチを押すまでの時間である。そのため本稿では、Yarnitsky らが使用した反応時間を閾値基準反応時間と呼ぶ。なお温度変化量条件は、温感呈示 (Warm sensation) は 1.5, 4.2, 6.7 [°C/s]、冷感呈示 (Cold sensation) 2.4, 4.5, 6.6 [°C/s] であった。また、温感呈示時の平均閾値基準反応時間は 0.73 (直接)、0.67 (間接) [s]、冷感呈示時では 0.50 (直接)、0.49 (間接)

[s] であった。詳細は文献 [8] を参照されたい。この実験に対し、本デバイスはユーザへの温冷感呈示箇所、面積が異なる。そこで比較検討のために実際の温度変化およびユーザの反応時間 (ペルチェ素子駆動から計測した反応時間) を調査した。

ペルチェ素子を駆動してからユーザが「温かい」または「冷たい」と認知するまでにどの程度の遅延があるかを知るため、制作したゲームコントローラによる温冷呈示とユーザの反応時間を実験測定した。温冷呈示出力はどちらもゲームコントローラデバイスの最大出力 (ペルチェ素子 1 つあたりを 5 V, 1.1 A 程度で駆動) とした。

制作したゲームコントローラは USB バスパワーでは駆動できない、比較的出力の大きい設計となっているが、まずはあらかじめ大きな出力を可能とし、実験において、どの程度出力を下げてもユーザに効果的に温冷呈示が可能かを検討する。

4.1 サーモカメラによる温度測定

試作したゲームコントローラにより、どの程度の温度変化呈示が可能になっているかを知るため、予備実験に先立ち、100, 80, 60% PWM 出力時におけるペルチェ素子の温度変化をサーモカメラ (APISTE 社製 FSV-7000E) を用いて計測した。本研究ではユーザが実験およびゲーム操作に本ゲームコントローラを利用する。すでに著者らが制作した図 3 に示す実験装置 [23] をゲームコントローラとして操作することと、一般的なゲームコントローラ型の形状を利用してゲームをユーザに操作することには大きな差があると判断したため、本稿ではサーモカメラによる性能評価を基にユーザの反応時間を検討することとした。

図 4 にサーモカメラ FSV-7000E で撮影した画像のサンプルを示す。制作したゲームコントローラ側面のペルチェ素子が温度変化している様子が分かる。図 5 は各温冷呈示に関して 100, 80, 60%出力における 8 秒間の温度変化を示しており、時刻 0 よりペルチェ素子を駆動し、5 秒後にそ

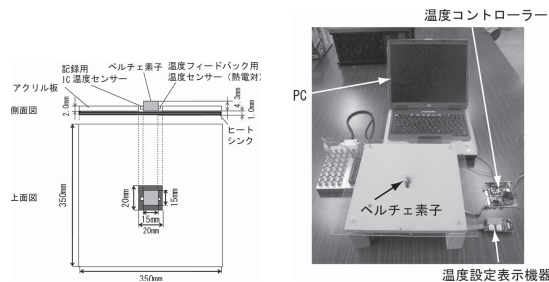


図 3 測定実験装置

Fig. 3 A measurement equipment for user tests.

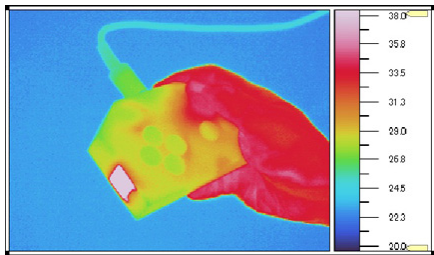


図 4 サーモカメラによる画像

Fig. 4 A captured image by the thermo camera.

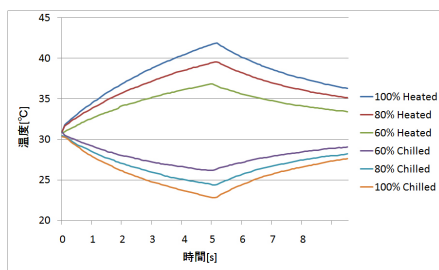


図 5 PWM によるペルチェ素子温度の温度の様子

Fig. 5 Curves of $\Delta\text{temperature}/\Delta\text{time}$ on a peltie element by PWM.

の出力を止めた。計測結果から、Yarnitsky らの実験条件と比較し、各出力の温度変化量が Yarnitsky らの温冷感呈示時における温度変化速度の範囲内である。100%出力時にも最初の 1 秒間について、温度変化量は温感が $3.7 [^{\circ}\text{C}/\text{s}]$ 、冷感が $-2.61 [^{\circ}\text{C}/\text{s}]$ であった。

4.2 被験者

被験者は、手掌部に怪我・病気の無い健康な若年群 (22.5 ± 1.4 歳) 13 人に協力を得た。著者らの事前実験 [23] より、若年群と高齢群では温冷呈示における反応時間に差がでること、ビデオゲームであることの 2 点から、今回は若年群のみを対象とした。

4.3 実験手順

被験者には、ゲームコントローラを実験者の指示した部位が触れるように自然に握ってもらった。その後被験者にゲームコントローラ側面のペルチェ素子が温かい/冷たいと感じたらゲームコントローラ上の赤ボタンを押してもら

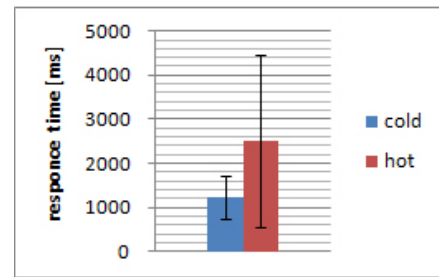


図 6 温冷呈示におけるユーザの反応時間の平均値と標準偏差。左が冷感呈示、右が温感呈示を示す

Fig. 6 Response time of average and standard deviation for the thermal sensation.

うよう説明を加えた。その後実験者の合図から 5 秒 + ランダム秒経過するとペルチェ素子が温かく/冷たくなり始める。被験者が赤ボタンを押すとペルチェ素子の駆動が止まり、さらに 5 秒 + ランダム秒経過した後再度ペルチェ素子が温かく/冷たくなり始める。この試行を温冷呈示ごとに各 20 回繰り返す。ペルチェ素子が駆動されてからユーザがボタンを押すまでの時間を反応時間とし、ms 単位で記録した。ペルチェ素子を駆動し、ユーザの温度閾値を超えた後、ユーザがゲームコントローラボタンを押すまでの時間が反応時間となる。なお予備実験ではペルチェ素子出力はいずれも 100% 出力である。

4.4 結果と考察

実験結果のグラフを図 6 に示す。縦軸が反応時間 [ms]、左が冷感呈示、右が温感呈示の平均値および標準偏差である。冷感反応時間は温感の倍程度の速さであり、本デバイス上において、温冷感ともに 3 秒程度あればその温度変化を被験者が感じ取ることができると分かった。なお、温感呈示に関して極端に反応時間が遅れる被験者が 1 人いたため、温感呈示反応時間の標準偏差が大きな値となっている。本実験に限らず、これまで本システムを利用して多くの展示を行ってきた中で、特筆して反応が遅いユーザが含まれていた。今後の実験や展示活動において、このようなユーザが他にもいるか注意深く観察する必要がある。

この実験ではまず出力が最大の状態での測定したが、現行の一般的なゲームコントローラは電池駆動も多くあるため、消費電力量はなるべく少ない方がよい。また消費電力を抑えることで冷却装置の小型化も可能である。Yarnitsky らによって報告された閾値基準反応時間では 3 パターンの温度変化速度において、変化がないことが報告されている。一方で、本稿で扱うペルチェ素子駆動を基準とした反応時間において、ペルチェ素子の出力条件を変えた場合、表面温度がユーザの反応閾値温度に達するまでの時間が異なると予想される。そこで、ユーザの反応時間と温度変化速度に関連性がある可能性が考えられるため、次の実験では出力条件を 100, 80, 60% の 3 種類で実験を行い、ユーザの

反応時間と温度変化速度に関連性があるのかを考察する。

5. 温度変化速度と反応時間に関する実験

ここまでの予備実験をふまえ、ペルチェ素子出力条件とユーザの反応時間の関連を知るために実験を行った。温冷ともに 100, 80, 60% で実験した。また実験後にアンケート調査も行い、ユーザが最も快適と感じた出力条件を回答してもらった。

5.1 被験者

被験者は、手掌部に怪我・病気のない健康な若年群 10 人 (22 ± 0.9 歳) の協力を得た。予備実験時と同じ理由から、今回も若年群のみを対象とした。

5.2 実験手順

予備実験で行った試行 (ただし 1 条件における測定回数は 10 回) を冷却/加温に関してそれぞれ 100, 80, 60% 出力条件で行い、ユーザの反応時間を計測した。冷却試行で各出力条件における反応時間を測定した後、加温試行で各出力条件におけるユーザの反応時間を測定した。各出力条件の呈示順番はランダムでユーザに呈示した。各冷却/加温試行の後にアンケート調査を行った。アンケートではユーザには冷却/加温試行に関して最も心地良いと感じた試行番号と、各試行における温かさ/冷たさの程度に関して順番をつけてもらった。冷却試行から加温試行に移る前に、被験者の手掌部温度の回復を兼ねたアンケート調査を入れた手順 (記入時間は約 3 分程度) とした。具体的な実験手順例は次のとおりとなる。

- (1) 被験者への実験内容説明
- (2) 冷却試行に関して実験スタート (ただし以下 a~c の順番はランダム)
 - (a) 60% 出力におけるユーザ反応時間を計測 (計 10 回)
 - (b) 80% 出力におけるユーザ反応時間を計測 (計 10 回)
 - (c) 100% 出力におけるユーザ反応時間を計測 (計 10 回)
- (3) 冷却試行に関するアンケート調査
- (4) 加温試行に関して実験スタート (ただし以下 a~c の順番はランダム)
 - (a) 60% 出力におけるユーザ反応時間を計測 (計 10 回)
 - (b) 80% 出力におけるユーザ反応時間を計測 (計 10 回)
 - (c) 100% 出力におけるユーザ反応時間を計測 (計 10 回)
- (5) 加温試行に関するアンケート調査
- (6) 実験終了

実験にかかる時間はユーザ 1 人あたりおおよそ 30 分であった。

5.3 結果

冷却試行におけるユーザ反応時間の測定結果を図 7 に示す。3 つの出力条件の違いを検討するため、条件を要因とする被験者内計画における一元配置の分散分析を行い、その後、多重比較を行った。分散分析の結果、条件による主効果が認められた ($F(2,18) = 5.93, p < 0.05$)。そこで多重比較を行った結果をみると、出力 100% 条件は、出力 60% ($p < 0.01$) および 80% ($p < 0.05$) 条件との間に有意差が見られた。つまり、ユーザの反応時間とペルチェ素子の温度下降速度には関連があり、100% 条件と他の条件に関しては下降速度が上がるとユーザ反応時間が早まることが示せた。また、アンケート結果から、各出力条件において 10 人中 7 人が最も心地良い条件として 80% 出力条件を選択した。出力条件の呈示順に関してはその順序を正しく認識できていたユーザは 10 人中 1 人であった。各出力条件において、有意差を認めることができたにもかかわらず、ユーザがその順序を主観的に把握できていない可能性が考えられる。

加温試行におけるユーザ反応時間の測定結果を図 8 に示す。加温試行においても冷却試行と同様に、条件を要因とする被験者内計画における一元配置の分散分析を行ったが、

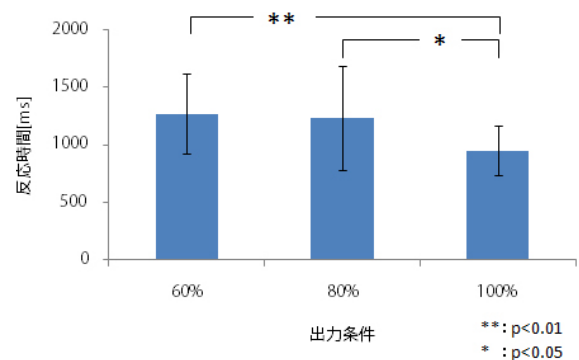


図 7 冷却試行の各出力条件におけるユーザ反応時間の平均と標準偏差

Fig. 7 Average and standard deviation of response time in each output condition of cooling trial.

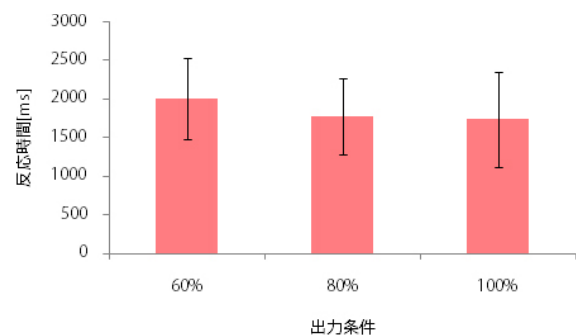


図 8 加温試行の各出力条件におけるユーザ反応時間の平均と標準偏差

Fig. 8 Average and standard deviation of response time in each output condition of heating trial.

条件間に有意差は認められなかった。またアンケート結果では、ユーザが心地良いと最も多く回答した試行は80%条件であったが、これに関しても他の出力試行と大きな違いは認められなかった。出力条件の呈示順に関してその順序を正しく認識できていたユーザは10人中2人であった。加温試行では各出力条件において有意差はみられなかったため、ユーザの主観的な評価もあまり差がなかったと考えられる。

5.4 考察

実験結果から、冷却試行実験に関しては、ユーザの反応時間とペルチェ素子における温度下降速度に関連があることが分かった。ユーザは冷覚呈示をされてから3出力条件下において2秒以内に反応をしており、100%出力時では1秒程度の反応時間がかかることが分かった。さらに冷却試行において、100%条件と他の条件には有意差が認められたことから、ペルチェ素子の温度下降速度を変化させることでユーザの反応時間がある程度制御できる可能性が示された。100%出力時の平均反応時間は952 [ms] であり、別途デバイスを設計し、それ以上の出力にて温度下降速度を上げることで、さらに平均反応時間を下げることができる可能性がある。

本ゲームコントローラ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、温冷箇所探索型のゲームであれば、ゲームの難易度を調整したい場合には1~2 [s] の範囲にて温冷呈示を調整すればよい。ただし最小出力条件を60%とする。次に、ユーザに心地良く温冷呈示を行うためには、出力条件を80%が好ましいことが分かった。しかし、長時間呈示し続けると80%出力であっても、ペルチェ素子温度は大きく下がるため、今後は長時間呈示に適切な温度コントロールに関する追加実験が必要である。

加温試行実験においては60~100%出力条件において、有意な差が認められず、本実験において温度上昇速度とユーザ反応時間に関連があることはいえない。加温呈示をユーザに気づかせるためには少なくとも2 [s] 程度が必要であり、100%出力条件においても反応時間の平均は1,783 [ms] であった。ユーザアンケートによる心地良いと感じる出力条件にも大きな違いは認められなかった。

ゲーム中に即時的に温冷感覚を呈示したい場合、数秒前に温冷呈示をすることがシステム上で決定できれば、イベントに合わせてあらかじめペルチェ素子を動作させることで、即時的に温冷呈示ができる可能性がある。その際本実験で得られた平均反応時間が参考になると考えられる。

6. ビデオゲームシステムの開発

6.1 設計の指針

ペルチェ素子を利用してユーザに温冷呈示を行うために

は、これまで述べてきたとおり、反応速度に関して注意しなければならない。そこでゲームの設計指針を設計指針1：操作決定が必要なもの、設計指針2：操作決定の必要のないもの（単純な演出として利用するもの）、の2つに分ける。本研究では実際に提案するゲームシステムはそれら設計指針に沿った2種類のゲームであるが、ビデオゲームジャンルは多岐にわたっており、各ゲームにおいて各設計指針がどのように応用可能かを以下に述べる。

6.1.1 設計指針 1

操作決定が必要なゲーム設計であり、現実において視聴覚で情報を取得（探す）することが困難な事象に対して温冷呈示を対応させることが考えられる。たとえばアクションゲームでは、ステージ上の特殊イベント位置や、敵機の属性把握（弱点把握）等において、温冷呈示を利用できる。またRPGゲーム等では、謎解きイベントに対して応用が可能である。ゲーム中の箱の中身、爆発位置といった次期イベントが起こるものに対して推測可能な情報を提供できる。このほか恋愛シミュレーションゲーム等で、意中の相手とのデート中の文脈にあわせて温冷呈示をすることで、告白のタイミングをユーザに知らせること等も可能と考えられる。

6.1.2 設計指針 2

操作決定が必要でないゲーム設計であり、主にゲーム中の場面に応じてユーザに適時呈示することで、ゲームの演出効果を高められる。砂漠や水中、寒冷地等といったゲーム場面に応じて温冷呈示をすることで様々なゲームジャンルに適応可能である。

以上の指針を基に、各設計指針に応じた2種類のゲームを制作した。一方のゲームはユーザの温感反応時間に関する知見を利用し、温冷呈示を利用しなければゲームクリアが困難となる条件を導入している。つまりプレイヤーが温冷呈示に基づいて操作を決定するゲームシステムである。もう一方のゲームは温冷呈示を演出として用い、操作決定には関与しないゲームシステムである。説明の便宜上前者をゲーム1、後者をゲーム2と以後表記する。

ゲーム1ではユーザが自機ロボットを操作し、爆発位置（ジャンプ位置）周辺にいる間はゲームコントローラに温感呈示が行われる。実験結果で得られた反応速度時間を利用して、温感呈示時間を決定することでユーザがゲームをクリアできるかを確認する。ゲーム2では反応時間が操作決定には影響しないが、ユーザに対する温冷呈示ゲームとして、ゲーム内の温度情報を伝えることがゲーム演出としてユーザにどのように働くのかを、ユーザ観察から確認することを目的とした。

このほか、ゲームを選択するためのメニュー（図9）と、プレイヤーの温冷呈示反応時間を計測し、その速さを他のユーザと順位をつけて表示する簡単なゲーム（図10）をあわせて制作した。図9右の青いCGオブジェクトに口

ボットが近づくと、ゲームコントローラ側面のペルチェ素子が冷却され、左の赤いCGオブジェクトでは加温される。CGオブジェクトとロボットの距離をもとにペルチェ素子はPWM制御され、近づくほどペルチェ素子の駆動電力が上がる。ユーザはまずはメニュー画面で、どの程度の温冷呈示がなされるか実際に知ることができる。

本ゲームシステムはLinux OS または MAC OSX 上で動作し、主に OpenSceneGraph ライブラリを利用し、C++ で制作した。

6.2 アプリケーション事例：ゲーム 1

まずゲーム 1 はロボットを操作し、足元からランダムに生じる爆発箇所を温感呈示により出力し、爆発時にその場所にユーザのロボットがいることによって、爆発に乗り、画面上部のコインを取得するゲームである。爆発箇所は温感のみによって呈示され、ユーザは視聴覚情報によって、次にどの場所が爆発するのかを知ることができない。温感

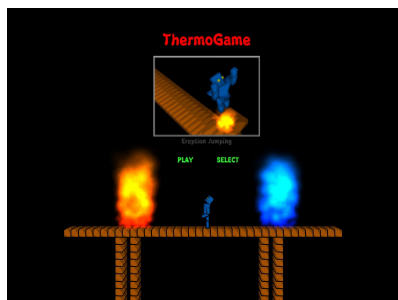


図 9 メニュー画面

Fig. 9 Screenshot of the game at menu mode.

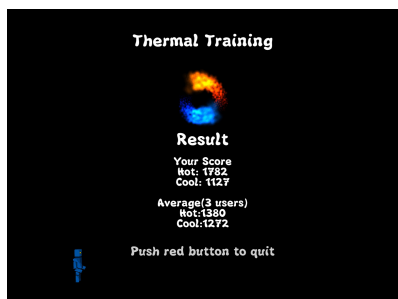


図 10 反応時間測定ゲーム

Fig. 10 Screenshot of a game that measure user's response time.

呈示において、100%出力時における平均反応時間は 2 秒弱であったため、少なくともユーザには 2[s] 以上の温感呈示をする必要がある。そこでロボットの移動速度において、爆発箇所を通るために要する時間（温感呈示間隔）を 2[s] に設定した。つまりユーザがロボットを操作し、次回爆発箇所を通る際、必ず 2[s] 以上の温感呈示ができるように調整した。図 11 はゲーム 1 のスクリーンショットであり、地面から起こる爆発をつかまえ、ジャンプをしている様子である。画面上部の緑色のオブジェクトが宝石であり、これらすべてを集めることでゲームクリアとなる。なおゲームのクリア時間が早いほど高い得点がクリア時に表示される。図 11 の右図は得点表示のスクリーンショットである。

6.3 アプリケーション事例：ゲーム 2

小型潜水艇を操作し、海上や海中を移動するシミュレータゲームである。ユーザの操作する潜水艇は海中に入ると、ペルチェ素子を通じてユーザに冷感呈示を行うものである。なおここでの冷却出力は 80% とし、3 秒間呈示後は 20% で冷感呈示を行う。図 12 はゲーム画面のスクリーンショットである。このゲームには明確なクリアはなく、

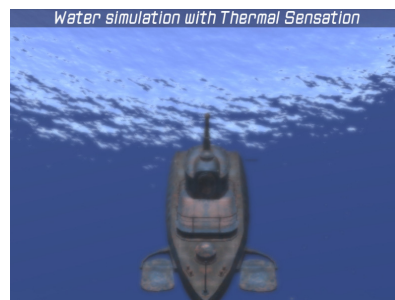


図 12 ゲーム 2 のスクリーンショット

Fig. 12 Screenshot of Game-2.

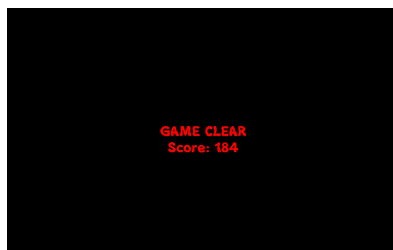
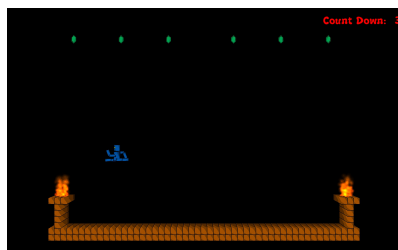


図 11 ゲーム 1 のスクリーンショット

Fig. 11 Screenshot of Game-1.

ユーザはゲームグラフィックと連動した冷感覚を楽しむことができる。

6.4 実際の操作時におけるユーザ観察

試作したゲームをユーザに操作してもらった。展示はこれまで計4回行っており、うち2回は学会発表会場（京都、東京）で、残りは展示イベントにおいてである。学会発表会場の1つを除いて残りは終日展示であり、1日を通して10～50歳代程度まで幅広く体験してもらった。ゲーム1に関して、クリア時間はユーザごとに違いがみられたが、爆発場所を感じ取ることができないといったことはなく、温感呈示を利用してゲームを楽しむ様子が観察できた。ゲームに慣れてくると、爆発場所を容易に特定できるようになっていくユーザの印象を受けた。実験では若年ユーザに限っていたが、実際の展示評価では50代のユーザも問題なく爆発箇所を特定できていた。

ゲーム2では海中に潜ると同時にゲームコントローラのペルチェ素子が冷たくなることでユーザの驚きを見て取れた。ただし一定時間経過するとユーザが冷感刺激に慣れてしまい、ペルチェ素子が冷たくなっているのを忘れてしまうような印象を受けた。このことからユーザへの冷感呈示を一定の時間周期で行い、常時冷感呈示を行わない設計に変更した。また興味深い意見として、海中に潜る際にペルチェ素子が冷える感覚が、高いところから落ちて「ヒヤッ」とする感覚に似ているというものがあった。このことからヒントを得て、ゲーム時の自由落下イベントに対し、ユーザの手掌部に急激な冷感呈示を行うことで、上記のような「ヒヤッ」とする感覚を提供できる可能性がある。

このほか、左右の温冷覚を独立に制御することで、熱呈示位置や方向を表現することができたら面白い、といった興味深い意見があり、今後の実験に活かす予定である。

7. 今後の展望

本稿ではビデオゲームにおける温冷呈示手法に関して実験、考察、アプリケーション事例の提案を行った。この過程と並行し、著者らは図3に示す測定機器を利用し、温冷感覚に関する基礎実験を行っている。そこでの結果は文献[23]で示したほか、反応時間に関して現在実験を行っている。

今回制作したゲームコントローラはAC電源を利用したが、今後は乾電池による電源を利用することで、より実践的なプロトタイプ提案を行う。さらに、制作したアプリケーション事例を基に多くのユーザに体験してもらうことで、より効率的にユーザに温冷呈示が可能なシステムを検討する。

ゲームコンテンツは2種類制作したが、既存のゲームジャンルは多種あり、それらと本インタラクションがどの程度応用可能か今後検討していく必要がある。また、既存

ゲームジャンルに限らず、温冷感覚呈示の特性を活かしたゲーム提案も検討している。たとえば、Kangら[24]によると、温冷呈示がユーザ間の信頼関係、決定判断に影響を及ぼすことや、決定判断活動中のNRI画像が異なる等の報告がある。ゲーム中のキャラクターとコミュニケーションを図る際に本手法を利用することで、温冷呈示独自のゲームインタラクションを提案できる。

参考文献

- [1] Kushiya, K. and Sasada, S.: Thermoesthesia, *Ars Electronica* 2006, pp.354-356 (2006).
- [2] Kushiya, K., Inose, M., Yokomatsu, R., Fujita, K., Kitazawa, T., Tamura, M. and Sasada, S.: Thermoesthesia: About collaboration of an artist and a scientist, *ACM SIGGRAPH 2006 Sketches*, New York, NY, USA, ACM (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/1179849.1180027> (2006).
- [3] Takada, K., Higurashi, K., Suzuki, T., Ota, M., Baba, T. and Kushiya, K.: Temperature design display device to use peltier elements and liquid crystal thermograph sheet "Thermo-Pict", *SIGGRAPH '09: Posters*, p.27:1, ACM, New York, NY, USA (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/1599301.1599328> (2009).
- [4] Kushiya, K., Baba, T., Doi, K. and Sasada, S.: Thermal design display device to use the thermal tactile illusions: "Thermo-Paradox", *ACM SIGGRAPH 2010 Posters*, p.99:1, ACM, New York, NY, USA (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/1836845.1836951> (2010).
- [5] Kushiya, K., Baba, T., Doi, K. and Sasada, S.: Temperature design display device to use peltier elements and liquid crystal thermograph sheet: "Thermo-Pict neo", *ACM SIGGRAPH 2010 Posters*, p.42:1, ACM, New York, NY, USA (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/1836845.1836890> (2010).
- [6] Kenshalo, D.R., Holmes, C.E. and Wood, P.B.: Warm and cool thresholds as a function of rate of stimulus temperature change, *ATTENTION, PERCEPTION, and PSYCHOPHYSICS*, Vol.3, No.2 (1968).
- [7] Fruhstorfer, H., Lindblom, U. and Schmidt, W.C.: Method for quantitative estimation of thermal thresholds in patients, *J. Neurol Neurosurg Psychiatry*, Vol.39, No.11, pp.1071-1075 (1976).
- [8] Yarnitsky, D. and Ochoa, J.L.: WARM AND COLD SPECIFIC SOMATOSENSORY SYSTEMS: PSYCHOPHYSICAL THRESHOLDS, REACTION TIMES AND PERIPHERAL CONDUCTION VELOCITIES, *Brain*, Vol.114, pp.1819-1826 (1991).
- [9] Yarnitsky, D. and Ochoa, J.L.: RELEASE OF COLD-INDUCED BURNING PAIN BY BLOCK OF COLD-SPECIFIC AFFERENT INPUT, *Brain*, Vol.113, pp.893-902 (1989).
- [10] Aulicciems, A.: Towards a psycho-physiological model of thermal perception, *INTERNATIONAL JOURNAL OF BIOMETEOROLOGY*, Vol.25, No.2, pp.109-122 (1981).
- [11] Morawe, V. and Reiff, T.: PainStation, *Ars Electronica2002* (2002).
- [12] Miyashita, H., Kosaka, T. and Hattori, S.: Development of Contents for Immersive 3D Wind Display, *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, Vol.12, No.3, pp.315-322 (online), available from

(<http://ci.nii.ac.jp/naid/10019957440/en/>) (accessed 2007-09-30).

- [13] Sawada, E., Awaji, T., Morishita, K., Furukawa, M., Aruga, T., Kimura, H., Fujii, T., Takeichi, R., Shimizu, N., Ida, S., Tokiwa, T., Sugimoto, M. and Inami, M.: A Wind Communication Interface: BYU-BYU-View, *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, Vol.13, No.3, pp.375-383 (online), available from (<http://ci.nii.ac.jp/naid/10021923872/en/>) (accessed 2008-09-30).
- [14] Nakashige, M., Kobayashi, M., Suzuki, Y., Tamaki, H. and Higashino, S.: "Hiya-Atsu" media: Augmenting digital media with temperature, *CHI '09: Proc. 27th International Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.3181-3186, ACM, New York, NY, USA (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/1520340.1520453> (2009).
- [15] Miyashita, H. and Kazushi, N.: 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).
- [16] Fujita, H. and Nishimoto, K.: Lovelet: A heartwarming communication tool for intimate people by constantly conveying situation data, *CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, p.1553, ACM, New York, NY, USA (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/985921.986129> (2004).
- [17] Narumi, T., Akagawa, T., Seong, Y.A. and Hirose, M.: Thermotaxis, *SIGGRAPH '09: Posters*, p.18:1, ACM, New York, NY, USA (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/1599301.1599319> (2009).
- [18] Dionisio, J.: Virtual Hell: A Trip Through the Flames, *IEEE Comput. Graph. Appl.*, Vol.17, pp.11-14 (online), DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/38.586012> (1997).
- [19] Murai, T., Yokoi, S., Sakaguchi, M., Arata, J. and Fujimoto, H.: Basic Study on Development of Display using Heat Sensation, *Human Interface, Correspondences on Human Interface*, Vol.8, No.5, pp.59-64 (online), available from (<http://ci.nii.ac.jp/naid/10018633443/en/>) (accessed 2006-12-06).
- [20] 坂口正道, 坂口正道, 横井 悟, 荒田純平, 藤本英雄: 高速制御が可能な温度ディスプレイの開発, 豊田研究報告, Vol.2008, No.61, pp.211-217 (2008).
- [21] Strughold, H. and Porz, R.: Die Dichte der Kaltpunkte auf der Haut des menschlichen Körpers, *Zeitschrift für Biologie*, Vol.91, pp.563-571 (1931).
- [22] Rein, H.: Über die Topographie der Warmempfindung, *Beziehungen zwischen Innervation und torischen Endorganen*, Vol.82, *Zeitschrift für Biologie*, pp.513-535 (1925).
- [23] 土井幸輝, 西川冬瑠, 串山久美子, 馬場哲晃, 瀬尾明彦: 温冷感覚特性と加齢効果, ジェロンテクノロジー研究フォーラム 2009, ISG 日本支部研究発表会, pp.25-28 (2009).
- [24] Kang, Y., Williams, L.E., Clark, M.S., Gray, J.R. and Bargh, J.A.: Physical temperature effects on trust behavior: The role of insula, *Social Cognitive and Affective Neuroscience/Oxford Journals*, pp.scan(210)1-9 (2010).



馬場 哲晃 (正会員)

1979 年長野県中野市生まれ。2005 年九州芸術工科大学大学院芸術工学府修了後, 2008 年九州大学大学院芸術工学府博士後期課程単位取得退学。博士(芸術工学)九州大学。2008 年 4 月より公立大学法人首都大学東京助教。所属はシステムデザイン研究科インダストリアルアート学域。

ACM 会員。



笠松 慶子 (正会員)

青山学院大学大学院理工学研究科経営工学専攻博士前期課程修了。青山学院大学理工学部経営工学科助手, 同大学同学部情報テクノロジー学科助手, 産業医科大学産業生態科学研究所助手, 金沢工業大学情報フロンティア学

部心理情報学科講師, 同大学情報学部心理情報学科准教授, 現在, 首都大学東京システムデザイン学部インダストリアルアートコース准教授。博士(工学)。日本人間工学会, ヒューマンインタフェース学会, 産業保健人間工学会, ACM, 日本デザイン学会等各会員。



土井 幸輝

1999 年早稲田大学理工学部卒業, 2006 年早稲田大学大学院人間科学研究科博士後期課程修了, 2004~2006 年早稲田大学理工学術院研究助手, 2007 年公立大学法人首都大学東京システムデザイン学部助教, 2009 年国立特別支

援教育総合研究所研究員, 現在に至る。博士(人間科学), 日本機械学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本人間工学会等の各会員。



串山 久美子

1986 年筑波大学大学院芸術研究科修了。2005 年東京農工大学特任准教授, JST さきがけ研究員, 2007 年首都大学東京教授, 現在に至る。メディア芸術およびインタフェースデザイン研究に従事。