

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 その手法の検討と開発

馬場 哲晃^{†1} 笠松 慶子^{†1}
土井 幸輝^{†2} 串山 久美子^{†1}

著者らはこれまでペルチェ素子を用いた温冷呈示インタラクションに関する研究を継続しており、本稿ではその知見をビデオゲームインタラクションに応用する。これまでビデオゲームにおける皮膚感覚呈示では振動モータを利用したものが主であり、温冷呈示のインタラクション手法に関する検討が少ない。そこで本研究では実際にペルチェ素子を配したゲームコントローラとシステムを自作し、ペルチェ素子の各出力条件(100,80,60%)におけるユーザの反応時間を測定・検証した。結果としてユーザの反応時間と温度変化速度は冷却試行においては関連があることや、ゲームシステムに利用するための反応時間に関する知見を得ることができた。上記を応用し、実際にビデオゲームシステムを制作し、ユーザからの意見やその様子をまとめた。

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

TETSUAKI BABA,^{†1} KEIKO KASAMATSU,^{†1}
KOUKI DOI^{†2} and KUMIKO KUSHIYAMA^{†1}

We have been continuing a 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.

1. はじめに

ビデオゲームコントローラ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、ゲーム側からユーザに視聴覚以外の情報を提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はあまり事例がみられない。そこで本研究では触覚呈示を利用したビデオゲームインタラクションに着目する。触覚にもいくつかの種類があり、著者らはこれまで、温冷呈示を利用したインタラクション研究を継続してきた。そこでの知見を応用し、本稿では温冷呈示ゲームインタラクションを扱う。

温冷呈示可能な代表的な部品モジュールとしてペルチェ素子があり、著者らもペルチェ素子を利用した冷温呈示インタラクションを提案してきた。この研究は科学技術振興機構「良いシーズをつなぐ知の連携システム(つなぐしくみ)」の助成を受け行った。

ビデオゲームにおいて、30/60fps 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はある程度無視できるような設計を検討する。つまり、水の中にいると冷たい、火の中に入ると熱いといった単純なものや、熱い又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。

温冷感覚をユーザに呈示する為に、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提示が可能なものを扱う。皮膚感覚提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提示が一般的

^{†1} 首都大学東京 システムデザイン研究科
Tokyo Metropolitan University

^{†2} 国立特別支援教育総合研究所
National Institute of Special Needs Education

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¹⁾ によるアートワーク「PainStation」があげられる。この他、風を利用した皮膚感覚呈示装置として宮下らによる風覚ディスプレイ²⁾ や、澤田らによる ByuByuByu³⁾ 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少ない。

温冷呈示を利用したインタフェース及びインタラクションに関する研究では、ディスプレイ装置⁴⁾ や、温冷呈示マウス⁵⁾、芸術表現応用⁶⁾ などが見られる。しかし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⁴⁾ は 1 秒間に 10 の温度変化が可能なデバイスを提案したが、その場合においても、ユーザの温冷反応速度が遅ければ即時的な温冷呈示は困難である。また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。著者らによる研究⁶⁾ では、ユーザのポインティング箇所にも CG、音、温度変化によるフェードバックを提供するアート作品を制作しており、これまでの発展として、ゲーム性を持った温冷呈示インタラクションを本稿では提案する。

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コントローラに実装可能なサイズとする。さらに長時間使用においてペルチェ素子が発熱し、制御不能とならぬよう、消費電力を抑える。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、それに伴ないユーザの反応時間が遅くなることが予想される。そこで実装したコントローラを利用して実験を行うことで、その反応速度変化を考察し、温冷呈示を利用したビデオゲームインタラクションの基礎をアプリケーション事例と共に提案する。

3. デバイスの実装

3.1 温冷呈示位置

温・冷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温冷感を提示するかに関して検討をおこない、温冷感提示位置をユーザの手掌に限定した。ゲームコントローラを握った際に、自然に温冷呈示をすること考慮したためである。冷点密度に関しては Strughold⁷⁾、温点密度に関しては Rein⁸⁾ 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わかっていて、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わかる。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。

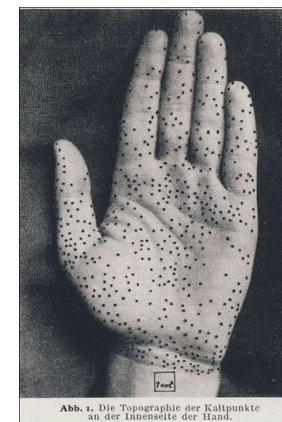


図 1 ヒトの皮膚上に分布する冷刺激を感じ取ると言われている冷点分布の様子
Fig.1 The topography of cold-scores points at the inside of the hand.

3.2 コントローラデバイス仕様

制作した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為にペルチェ素子は大きすぎず、従来の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 15mm 角、厚みが 3.8mm のペルチェ素子をコントローラ各側面に一つずつ配した。プロトタイプ成形には 3D プリンタ (Dimension 社製 1200es) を用いた。

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 UART 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。ペルチェ素子を駆動するためのメッセージは 3Byte から構成され、それらを PC 側で操作することでそれぞれ二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 7.3W であり、その 80% 以下である 5.8W 程度を 100% 出力として設計した。ペルチェ素子を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 11.6W 程度の電力が必要となる。

3.3 冷却機構

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付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

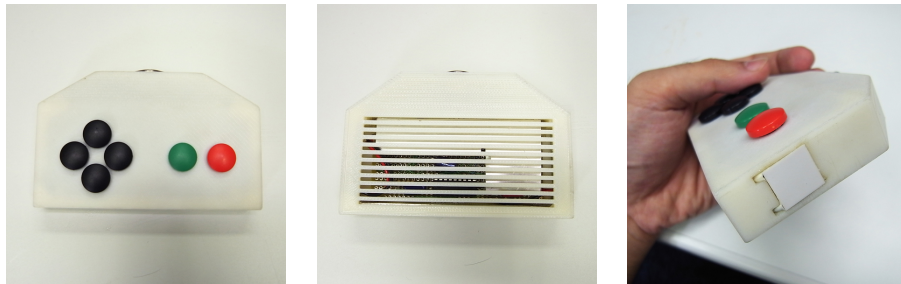


図 2 左：コントローラ前面，中央：コントローラ背面，右：側面に配したペルチェ素子
Fig.2 Left: Front of the controller. Center: Rear of the controller. right: A peltier element putted on the side of the controller

表 1 試作したコントローラデバイスの仕様
Table 1 Details of the prototype controller

コントローラ寸法	120x55(最長部:75)x20 (WxDxH)mm
コントローラ材質	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 15x15x3.8(WxDxH)mm
ペルチェ規格	最大電力 7.3W
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, 9600bps
駆動電流量	0~2.4A
使用電力	11.6W(最大)

が、今回は駆動電力が少ないこと、常に温冷呈示はしないこと、コントローラの大型化を避けることの以上 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得るため、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。制作したコントローラデバイスの仕様を表 1 に示す。

4. 温度変化速度と反応時間に関する実験

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、制作したコントローラデバイス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コントローラデバイスの最大出力（ペルチェ素子一つあたりを 5V, 1.1A 程度にて駆動）とする。温冷試行ともに 100,80,60% 出力条件下にて実験した。また実験後にアンケート調査を行い、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。本実験の目的は、温冷呈示におけるユーザの反応速度と、出力条件を変更した場合のユーザ反応速度変化に関する知見獲得である。

4.1 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）に協力を得た。著者らの事前実験⁹⁾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ため、今回はビデオゲームということもあり、若年群のみを対象とした。

4.2 実験手順

被験者には、コントローラデバイス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/冷たいと感じたらコントローラ上の赤ボタンを押してもらお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 10 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。

上記を温冷試行それぞれ 100,80,60 % 出力条件下にて行い、ユーザの反応時間を計測した。冷却試行にて各出力条件における反応時間を測定した後、加温試行にて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にてユーザに呈示した。各冷却/加温試行の後にアンケートに答えてもらいった。アンケートではユーザには冷却/加温試行に関しても最も心地よいと感じた試行番号と、各試行に関してその温かさ/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通りとなる。

- (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ー一人あたりおおよそ 30 分であった。

4.3 結 果

冷却試行におけるユーザ反応時間の測定結果を図 3 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された。また、図 4 に示すアンケート結果から、各出力条件において 10 人中 7 人が最も心地よい条件として 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。

加温試行におけるユーザ反応時間の測定結果を図 5 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い、その後、多重比較を行った。分散分析の結果、条件間における有意差は認められなかった。また図 6 に示すアンケート結果では、ユーザが心地よ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。

4.4 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わかった。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わかった。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を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

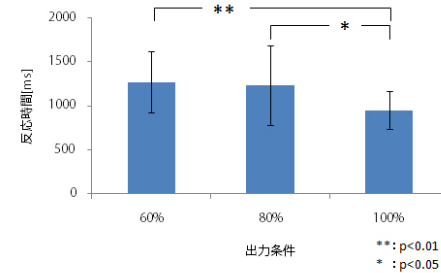


図 3 冷却試行の各出力条件におけるユーザ反応時間の平均と標準偏差

Fig. 3 Average and standard deviation of response time in each output condition of cooling trial.

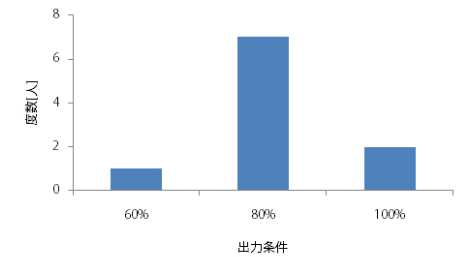


図 4 加温試行における「心地よい」と選択された出力条件の集計結果

Fig. 4 The result of the selected output condition, saying that "It is comfortable" by the user questionnaire.

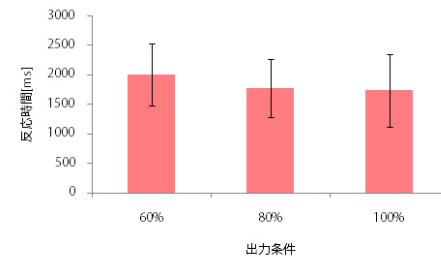


図 5 加温試行の各出力条件におけるユーザ反応時間の平均と標準偏差

Fig. 5 Average and standard deviation of response time in each output condition of heating trial.

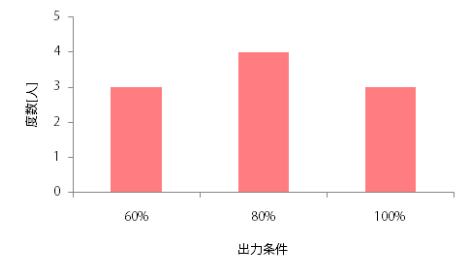


図 6 加温試行における「心地よい」と選択された出力条件の集計結果

Fig. 6 The result of the selected output condition, saying that "It is comfortable" by the user questionnaire.

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、これによって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、ユーザに心地よく温冷呈示を行うためには、出力条件を 80% が好ましいことがわかった。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言えない。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 1783[ms] であった。ユーザアンケートによる心地よ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予めペルチェ素子を動作させることで、イベントに合わせて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。

5. ビデオゲームシステムの開発

ここまでの考察を踏まえた上で、2 種類の温冷呈示を利用したビデオゲームを制作した。一方のゲームはユーザの温覚反応時間に関する知見を利用したもので、もう一方のゲームはユーザへの「心地よい」冷覚呈示を利用したものである。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。またこの他、ゲームを選択するためのメニューと、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を合わせて制作した。本ゲームシステムは Linux OS 上で動作し、主に OpenSceneGraph ライブラリを利用し、C++にて制作した。

5.1 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覚呈示により特定し、爆発時にその場所にいることによって、画面上部のコインを取得するゲームである。温覚呈示において、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] 以上の温覚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、爆発箇所を通る為に要する時間（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] 以上の温覚呈示ができるように調整した。図 7 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捕まえ、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 7 の右図は得点表示のスクリーンショットである。



図 7 ゲーム 1 のスクリーンショット。
Fig. 7 Screenshot of Game 1

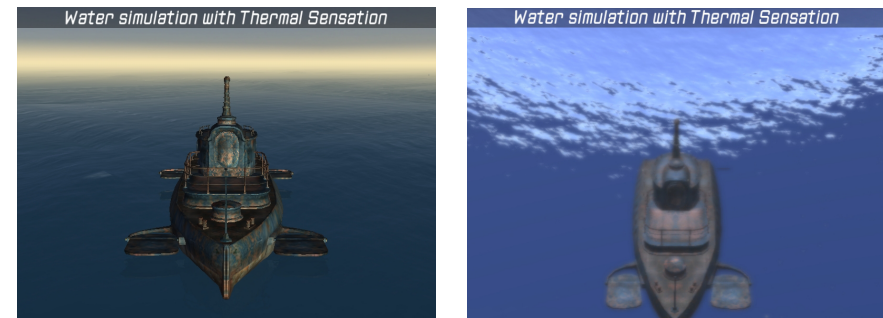


図 8 ゲーム 2 のスクリーンショット。
Fig. 8 Screenshot of Game 2

5.2 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覚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 % にて冷覚呈示を行う。図 8 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、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。

5.3 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。ゲーム 1 に関して、クリア時間はユーザごとに違いが見られたが、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、温覚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

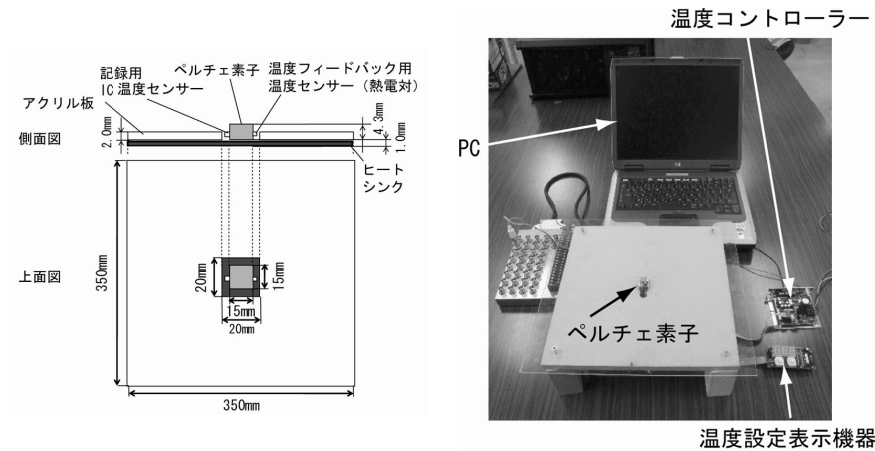


図9 測定実験装置

Fig.9 A Measurement Equipment for User Tests

定できるようになっていくユーザの印象を受けた。

ゲーム2では海中に潜ると同時に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覚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うけた。このことからユーザへの冷覚呈示を一定の時間周期で行い、常時冷覚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つた。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覚呈示を行うことで、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。

6. 今後の展望

本稿ではビデオゲームにおける冷温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9に示す測定機器を利用した、冷温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⁹⁾で示した他、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、その知見を収集し、得られた知見から冷温呈示を利用したビデオゲームインタラクションの基礎を確立することを今後の目的とする。

参考文献

- 1) Volker Morawe and Tilman Reiff. Painstation. *Ars Electronica*2002, 2002.
- 2) Homei MIYASHITA, Takayuki KOSAKA, and Shimmi HATTORI. Development of contents for immersive 3d wind display. *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, Vol.12, No.3, pp. 315-322, 2007-09-30.
- 3) Erika SAWADA, Tatsuhiro AWAJI, Keisuke MORISHITA, Masahiro FURUKAWA, Tomohisa ARUGA, Hidetoshi KIMURA, Tomoko FUJII, Ryuta TAKEICHI, Noriyoshi SHIMIZU, Shinya IDA, Takuji TOKIWA, Maki SUGIMOTO, and Masahiko INAMI. A wind communication interface : Byu-byu-view. *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, Vol.13, No.3, pp. 375-383, 2008-09-30.
- 4) Toshifumi MURAI, Satoru YOKOI, Masamichi SAKAGUCHI, Jumpei ARATA, and Hideo FUJIMOTO. Basic study on development of display using heat sensation. *Human Interface. Correspondences on human interface*, Vol.8, No.5, pp. 59-64, 2006-12-06.
- 5) 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, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- 6) Kumiko Kushiya and Shinji Sasada. Thermoesthesia. *Ars Electronica*2006, pp. 354-356, 2006.
- 7) H.Strughold and R.Porz. Die dichte der kaltpunkte auf der haut des menschlichen korpers. In *Zeitschrift fur Biologie*, Vol.91, pp. 563-571, 1931.
- 8) HRein. Uber die topographie der warmempfindung. In *Beziehungen zwischen Innervation und torishen Endorganen.*, Vol.82, pp. 513-535. *Zeitschrift fur Biologie*, 1925.
- 9) 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, 2009.