

VR空間で全周囲から触覚刺激を提示する為の熱源の配置と検討

伊藤 亘輝¹ 羽田 久一^{1,a)}

概要: 昨今の VR における触覚刺激を提示する研究は、HMD 以外のデバイスを付与する事で重量の増加やデバイスの装着による煩わしさが増加し、体験を損なっていると考える。そこで我々は、被験者が HMD 以外のデバイスを装着する必要の無い非接触での熱刺激の提示に着目した。これにより、被験者の全周から熱刺激を知覚する為に、必要な熱源の台数と配置を検証したところ、被験者の斜め前方と斜め後方に配置した 4 台のカーボンヒーターで全周から熱刺激を知覚可能という結果に至った。また、熱刺激と風の刺激を同時に提示する事で被験者に暖風と錯覚させる事が可能であった。

キーワード: VR, 熱, 風, 触覚, 非接触

1. はじめに

VR 環境において没入感や臨場感を演出する場合、視覚と聴覚のみに情報を提示するよりも、嗅覚や触覚といった人が有する感覚を視覚や聴覚と共に提示する方が臨場感や没入感を向上させやすい。また、感覚を提示するデバイスが身体に身に付ける装置であった場合に、装置の重量や装着時の圧迫感といった要素が、没入感に影響を与えている事から、VR を体験する被験者には、HMD 以外のデバイスを装着せずに刺激を提示した方がより良い没入感や臨場感の演出が可能である。我々の過去の研究 [1] では、送風機を用いた非接触での触覚刺激を、風向を誤認識する角度から HMD を装着した被験者に対して、全周から刺激を知覚させる為には 4 台の送風機のみで可能であると判明した。

過去の研究では、被験者に送風を行い、全周から風による刺激を与える為に必要な送風機の台数と配置を検証する実験を行ったが、送風によって被験者が感じる風は冷たいものであり、暖かさを提示するには至らなかった。非接触での熱刺激の提示は、温めた空気を放出する方法や、遠赤外線を放射する事で物体を素早く温める方法がある。

そこで、HMD 以外のデバイスを装着せずに、被験者へ素早く熱刺激を提示する手法として、遠赤外線の放射による非接触での熱刺激の提示を試みる。HMD 上において熱源を表示し、実空間では遠赤外線による非接触での熱刺激を与える事で、被験者は HMD 以外の装置を装着する事な

く VR 体験に没入する事が可能であり、HMD 上に表示された熱源を視覚だけでなく皮膚感覚として知覚する事が可能であると考えた。本稿では、過去の研究で用いた風向を誤認識する角度から VR を体験する被験者に熱刺激を提示する事で、熱刺激を全周から知覚可能であるかを検証する。また、熱刺激に加えて、以前の研究で使用した風の刺激を組み合わせる事で、被験者が暖風と錯覚する事が可能かどうかの検証を行う。

2. 関連研究

2.1 熱を用いた VR デバイスの研究

この節では HMD に付随するウェアラブルデバイスとして開発された研究と VR を体験する被験者に対して熱刺激を提示する研究を挙げる。

我々の過去の研究 [2] において、VR を体験する被験者の頸部に対して、ペルチェ素子を組み込んだ首輪型のウェアラブルデバイスによる熱刺激の提示を行った。これにより、VR を体験する被験者が熱刺激を知覚する事で、HMD に表示されたオブジェクトが視界に存在しない場合であっても熱を知覚する方向によって向きの識別を試みた。この研究では首に巻きつける形状のウェアラブルデバイスを制作したが、巻きつける事による圧迫感や、肌とペルチェ素子の間に存在する熱伝導シートに違和感を覚えるといった課題が挙げられた。対して本稿では被験者の体に、デバイスを取り付ける事なく刺激提示を行っており、被験者の VR 体験にウェアラブルデバイスの装着による負担を掛けることの無いシステムとなっている。

¹ 東京工科大学

^{a)} hadahskz@edu.teu.ac.jp

Nimesha Ranasinghe[3]らはVRにおいて没入感のある体験を提供するためには、周囲の環境条件による感覚認識が不可欠であると考えた。そこで、VRを体験する被験者の首後方に取り付けられたペルチェ素子で熱刺激を提示し、HMDに組み込んだ送風ファンで風による触覚刺激を提供した。これにより、被験者が体験するコンテンツに応じた刺激を与える事で、従来の視覚と聴覚を用いたVR体験と比較し、有意改善が観察された。本稿では被験者がHMD以外のデバイスを装着する事なく、コンテンツに応じた熱と風の刺激提示を行う事で、全周における刺激の知覚を検証する。

Tommy Nilsson[4]らはマルチモーダルな刺激をVRに組み込む事で、VRを用いた火災時における避難訓練システムを提案した。提案したシステムは視覚と聴覚を用いるVR体験に、熱刺激と嗅覚への刺激を付与する事で、被験者が実際に避難訓練を行うのと同様の臨場感を提供した。熱刺激はヒーターからの放熱で提示され、嗅覚への刺激はディフューザから煙の匂いを放出する事で、被験者に提示した。これにより、視聴覚のみの避難訓練と本システムを用いての避難訓練を比較・検証した結果、視聴覚のみならず熱や匂いといったマルチモーダルな感覚の付与がVR体験に有用であることを示している。本稿では被験者の周囲から熱刺激を提示しており、被験者と密着せずにマルチモーダルな刺激を提示する事に対する有用性を示している。

Roshan Lalintha Peiris[5]らはVRへの没入感を向上させる為に、HMDの内側にペルチェ素子を取り付ける事で、VRを体験する被験者の顔面に熱刺激を提示した。彼らは顔面へ熱刺激を提示する事の有用性を確認する為に、被験者が体験するVR環境にオブジェクトを配置し、オブジェクトと同じ方向に位置するペルチェ素子を加熱した。これにより、被験者が視認しているオブジェクトから放熱が行われていると錯覚し、頭部前面に対して熱刺激での方向の識別が可能である事を示した。本稿では、HMDの内側ではなく外側から熱刺激を提示する事で、HMDの内側のみという範囲に制限される事なく被験者の全周への熱刺激の提示が可能となっている。

Kyunggho Jeong[6]らはペルチェ素子による熱刺激を用いて情報を提示するツールとして、手首に装着する腕輪型デバイスと首に対して装着するデバイスを提案した。手首と首に配置した複数のペルチェ素子によって熱刺激を与えることで被験者が熱刺激を提示しているペルチェ素子を認識できるかの実験を行なった。結果は熱した部分によっては知覚が困難であり、冷やした場合は順々に刺激を与えるよりも一方向からの刺激の方が指向性を感じられた。本稿では被験者がHMD以外のデバイスを装着せずに、周囲から熱刺激を提示する事によって全周からの知覚が可能である。

2.2 風を用いたVRデバイスの研究

この節では風による触覚刺激をユーザに提示する為にHMDに取り付けるウェアラブルデバイスとして開発された研究を挙げる。

Michael Rietzler[7]らはVRを体験する被験者に風による触覚刺激を提示する事で、没入感の増強を試みた。VaiRはHMDを装着する被験者の頭部を覆う形で配置した複数のノズルから、風を放出する事で触覚刺激の提示を試みたウェアラブルデバイスである。VRコンテンツにおける風のアニメーションやエフェクトによる表現をノズルからの送風で再現する事で、実際の風がVR体験中の被験者に深い没入感を与える事を示した。本稿では被験者がウェアラブルデバイスを身につけずに、熱と風の刺激を提示する事で全周から触覚刺激の知覚を試みる。

Jaeyeon Lee[8]は皮膚に密着したデバイスによる風の刺激が被験者に不快感を与えると考え、風刺激を与える為の非接触型デバイスを開発した。クリップと小型の送風機を合わせたデバイスを被験者の服や袖に掛け送風を行う事で、皮膚に密着する事で風の刺激を提示する従来のデバイスと同等の精度で、刺激を提示可能であることを示した。本稿では服や袖に取り付ける事なく、被験者との接触をより離れた位置から刺激を提示する事で、全周から刺激の知覚を試みる。

Cardin Sylvain[9]らは無人航空機の遠隔操縦において、飛行中の航空機が受ける風をパイロットに提示する事で、航空機の操縦を支援するシステムを開発した。このシステムでは頭部の全周に設置した8つのファンを用いて、風の刺激をパイロットに提示する。これにより、これまで視覚情報のみで判断していた風の情報をパイロットが刺激として受け取る事で、操縦に必要な情報の補完を行なっている。本項では被験者にはHMDのみを装着する事で、VR体験時に負担をかける事無く全周からの刺激提示を行なった。

3. 被験者の全周から提示する刺激の提案

我々の過去の研究[1]では、VRを体験する被験者の斜め前方と斜め後方の4方向からファンによる送風を行う事で、HMDに表示する画像に応じて、全周から送風が行われていると風向を錯覚させる事が出来ている。被験者へ風向錯覚を行う為に配置したファンの角度は被験者の正面を0度として、時計回りに39度、134度、226度、321度となっており、これらの角度から送風を行う事で、4台のファンで全周に向けて風を提示する事ができた。

本稿では、上記の風向を錯覚する角度を基に、被験者の全周から非接触での熱刺激の提示を試みる。VRを体験する被験者に刺激を与える熱源の配置は、図1の角度aからdであり、以前の研究における送風機を配置した角度である。これにより、風刺激を提示した角度と同じ角度で熱刺激を提供し、被験者が全周囲から熱刺激を知覚する事が可

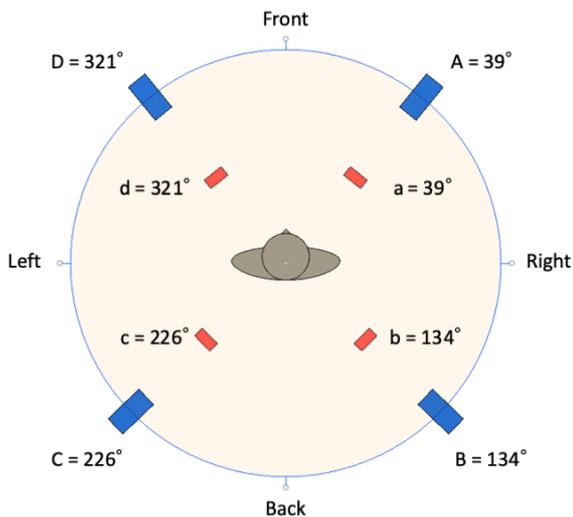


図 1 被験者へ刺激を提示する風源と熱源の配置

能であるかを検証する。また、熱刺激と風による刺激を組み合わせることによって、VR を体験する被験者に暖風と錯覚させる事が可能であると考えた。そこで、図 1 の A から D に配置した送風機と a から d に配置した熱源を同時に制御する事で VR を体験する被験者に対して暖風を錯覚可能であるかについても検証を行う。

4. 実装

4.1 VR 環境の構築

実験で使用する HMD には HTC Vive を使用し、提供するコンテンツの実装にはゲームエンジンである Unity を用いた。図 2, 図 3 は実験に使用した VR 空間であり、イソップ寓話の一つである「北風と太陽」をモチーフとしている。VR 空間内において、被験者は周囲を山に囲まれた展望台の中央に位置しており、実験に応じてそれぞれの環境を使用する。「北風と太陽」の演出は VR 空間上の背景を切り替える事で行い、北風の環境では曇り空の背景に風をイメージしたパーティクルを組み込む事で、曇り空の中で被験者に向けて冷たい風が吹いている環境を演出する。太陽の環境では晴天の背景を使用し、熱刺激を提示する方向に太陽を模した光源と、パーティクルによって暖かい風を演出する。空間に配置した光源は常に図 1 正面の位置に存在し、Unity 内で熱刺激を提示する方向にカメラの角度を切り替える事で、全周から熱刺激を提示する。HMD に図 2 の環境が表示された際には熱と風の刺激の両方を提示し、HMD に図 3 の環境が表示された際には送風機のみで刺激を与える。図 4 は VR 環境で風の演出に使用したパーティクルであり、環境で使用した風の演出には 1000 個のパーティクルを使用し、パーティクルが生成されてからの

時間経過に応じて、パーティクルの色と速度を変化させる事で表現した。



図 2 被験者に提示する VR 内の環境 (晴天)

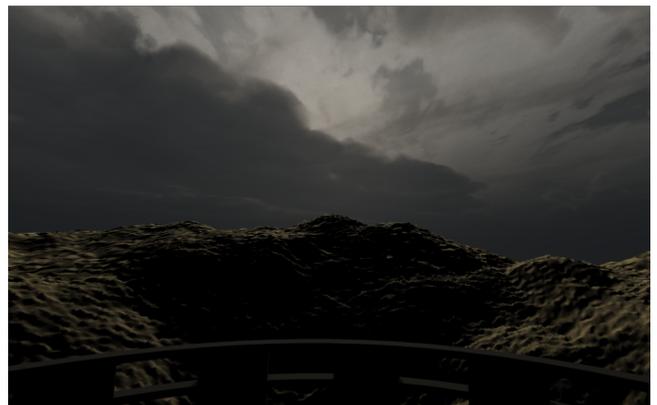


図 3 被験者に提示する VR 内の環境 (曇天)



図 4 風の演出に使用したパーティクル

4.2 熱刺激の制御

被験者に熱刺激を提示する為に、熱源として maxzen の 900W カーボンヒーターを使用した。カーボンヒーターは遠赤外線を放射する事で空気を温める事なく皮膚を直接温める。これによりファンヒーターと比較して速暖性に優れている為、非接触での熱刺激の提示に適している。実験中のカーボンヒーターは常に駆動しており、熱刺激の制御には、図5のヒーターの手前に配置したアルミ製の遮熱板を左右に移動させる事で被験者への熱刺激の提示を遮る。遮熱板の開閉は「Arduino Uno」とステッピングモータードライブである「A4988」を利用したステッピングモーター使用し、モーターを駆動する事で遮熱板を左右に移動させ、被験者の体験する VR 環境に応じたタイミングでの熱刺激の提示が可能である。



図5 アルミ板を用いた遮熱機構

4.3 送風機の制御

送風機には IRIS OHYAMA の PCF-HD15-W を用いた。実験は適切な風速による送風を被験者に与える必要があるが、その為には送風機のスイッチよりも細分化され手の調節が必要とされた。そこで送風機に掛かる電圧を制御する為にソリッドステート・リレーの「AQG22105」を用いる。送風機4台の制御にはマイコンボードである「Arduino Uno」を使用し、PWM 信号によって送風機に掛かる電力を調節する事で風量を制御した。これにより、4台の送風機を同時に制御する事が可能である。

4.4 刺激提示までにおける装置の制御

図6は各種装置からの刺激を被験者に提示するまでの流れである。Unity内に作成したVR環境で、実験の角度に応じてパーティクルの放射角度を切り替える。その後、実験を行う角度に対応したカーボンヒーターの遮熱板と送風機を制御する。

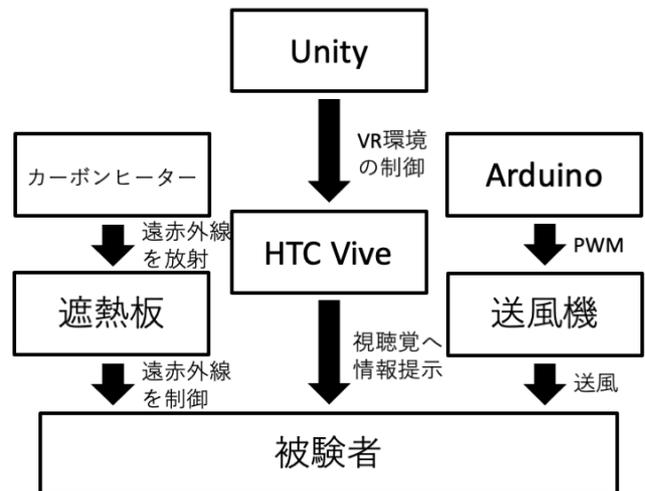


図6 被験者への刺激提示までの流れ

5. 実験

実験は室温 24 度の無風の部屋で行い、被験者は 22~23 歳の男子学生 4 名である。図7は実験の様子である。HMD とイヤフォンを装着した被験者に対して、カーボンヒーターと送風機によって熱と風の刺激を提示する。本稿では、熱刺激の実験と、熱と風を同時に提示する2つの実験を行った。HMD に表示した映像(図2, 3)に応じて、被験者に対し風向を錯覚する角度から熱刺激単体での刺激提示を行う事で全周から熱刺激を知覚可能であるかの検証実験と、熱刺激と風の刺激を同時に提示した場合において、全周から刺激を知覚可能であるかを検証する実験を行った。また、HMD に表示した錯覚を試みる角度は、被験者の正面を0度として時計回りに45度毎に回転した角度であり、熱と風の刺激を組み合わせた場合において基準となる環境風の強さは、ビューフォート風力階級における至軽風(風速 1.5m/s)を使用した。当実験において図1における送風機と中心までの距離は1.7メートルであり、カーボンヒーターから中心までの距離は送風機と中心までの半分の距離となる0.85メートルとなっている。これは送風機によって遮られない範囲から熱刺激の提示を行うことで、被験者に提示する刺激が暖風であると錯覚を試みた為である。

5.1 実験手順

以下は実験の手順である。

- (1) 被験者は、送風機とカーボンヒーターの中央に配置した椅子に座り HMD を装着する。
- (2) 被験者には耳に付けたイヤフォンから実験の手順について説明を行う。



図 7 実際の実験風景

- (3) 実験手順についての説明の後に被験者は目を瞑り、HMDには図2を提示する。そして、被験者のイヤフォンから風が流れる音とカーボンヒーターからの刺激を与える。
- (4) イヤフォンを通じて目を開ける指示を被験者に向けて行う。カーボンヒーターからの熱を受けた被験者に対して、実際に知覚している熱刺激がHMDに表示された映像内の熱源の位置から放熱が行われている状態において、違和感の有無についていくつかの質問を行った。
- (5) 一つの角度での問答を行なった後に、次の角度に移行する。

実験中に行った質問の項目は、表1である。

表 1 実験中に被験者へ提示した質問の一覧

質問内容	評価
熱刺激を提示した際にHMDに表示した熱源の方向から熱を感じたか	1 から 4
熱と風刺激を同時に提示した際にパーティクルの流れる方向から熱を感じたか	1 から 4
熱と風刺激を同時に提示した際にパーティクルの流れる方向から風を感じたか	1 から 4
熱と風刺激を同時に提示した際にパーティクルの流れる方向から暖風を感じたか	1 から 4

実験は、熱刺激のみを提示した後、熱と風の刺激を同時に提示する。また、刺激を提示してから次の角度に移行するまでの間に、被験者に送風を行う事で、熱刺激に対する知覚のリセットを試みる。

5.2 熱刺激を用いた実験と結果

熱刺激のみを用いた実験は被験者の周囲に配置したカーボンヒーターから遠赤外線を提示する事で行う。被験者の前後左右から刺激を提示する際には、提示を試みる方向の両側に位置するカーボンヒーターを用いる。例として、被験者の正面から刺激を提示する際には、図1のaとdに位置するカーボンヒーターで遠赤外線を放射する事で熱刺

激を提示する。また、被験者の斜めから刺激の提示を行う場合は、該当する方向にもっとも近いカーボンヒーターによって熱刺激を提示する事で被験者の全周への刺激提示を行う。

熱刺激を用いて全周から熱刺激を知覚可能であるかを検証した結果、被験者の全周へ熱刺激を提示する為には、以前の研究と同様の角度に配置した4台のカーボンヒーターによって遠赤外線を放射する事で可能であると判明した。4台の熱源の配置は図1におけるaからdである。

図8はHMDに表示した映像に対して熱刺激を提示した際に、被験者がHMDに表示した熱源の方向から熱刺激を知覚する事が出来た被験者の角度毎の人数である。カーボンヒーターによって遠赤外線を放射する事で、被験者の全周から熱刺激を知覚する事が可能であるという結果を示している。

5.3 熱と風の刺激を用いた実験と結果

熱と風の刺激を同時に提示する実験では、熱と風の刺激を組み合わせる事で被験者への刺激提示を試みる。この時、被験者に提示する風の刺激は以前の研究で行った送風機4台を用いての刺激提示と同じ配置で行う。斜めから刺激を提示する場合は、最も近い送風機とカーボンヒーターで刺激提示を行い、前後左右から刺激を提示する場合は、最も近い2つの送風機とカーボンヒーターを半分の出力で制御する事で行う。実験では、熱と風の刺激を同時に刺激を提示した際に、それぞれの刺激が全周から知覚可能であるかを検証し、熱と風の刺激を組み合わせる事で被験者が暖風を知覚する事が可能であるかを検証する。

実験の結果は図9から図11である。図9はHMDに表示した映像に対して熱と風の刺激を提示した際に、被験者がHMDに表示した熱源の方向から熱刺激を知覚する事が出来た被験者の角度毎の人数であり、熱と風の刺激を同時に提示した状態であっても、全周からの熱刺激を提示する事が可能であると判明した。

図10はHMDに表示した映像に対して熱と風の刺激を提示した際に、被験者がHMDに表示した熱源の方向から風の刺激を知覚する事が出来た被験者の角度毎の人数であり、全周から刺激を知覚可能という結果に至った。

図11はHMDに表示した映像に対して熱と風の刺激を提示した際に、被験者がHMDに表示した熱源の方向から暖風を知覚する事が出来た被験者の角度毎の人数である。実験の結果から、熱と風の刺激を同時に提示する事で、被験者に暖風と錯覚可能であると判明した。

6. 考察

熱刺激を用いた実験において、図8におけるあまり刺激を感じないと評価した被験者が1名存在した。被験者があまり刺激を感じないと評価した方向は、全周から熱刺激

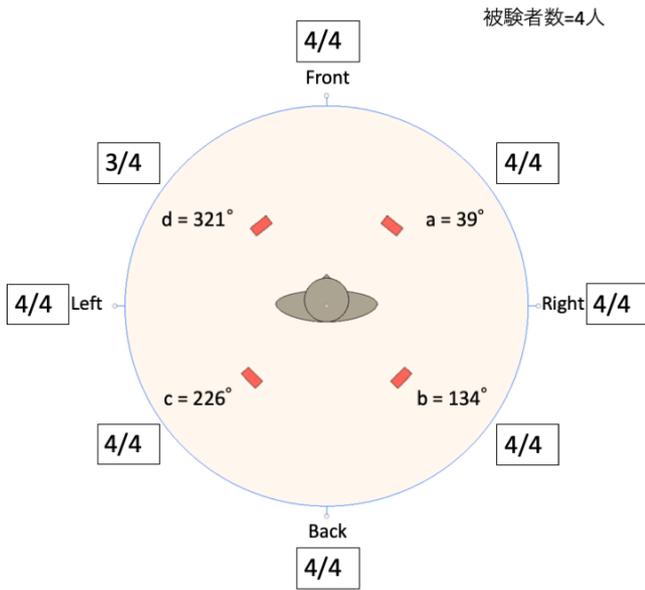


図 8 熱刺激のみを用いて全周から熱刺激の知覚を試みた実験の結果

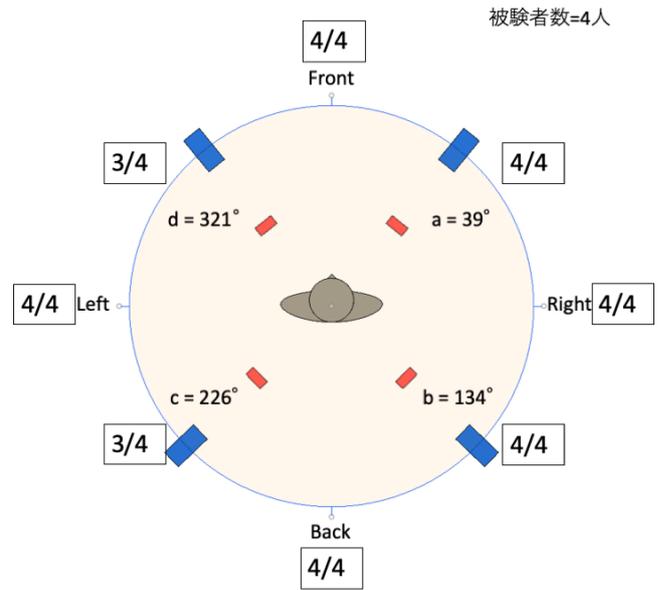


図 10 熱と風刺激を用いて全周から風刺激の知覚を試みた実験の結果

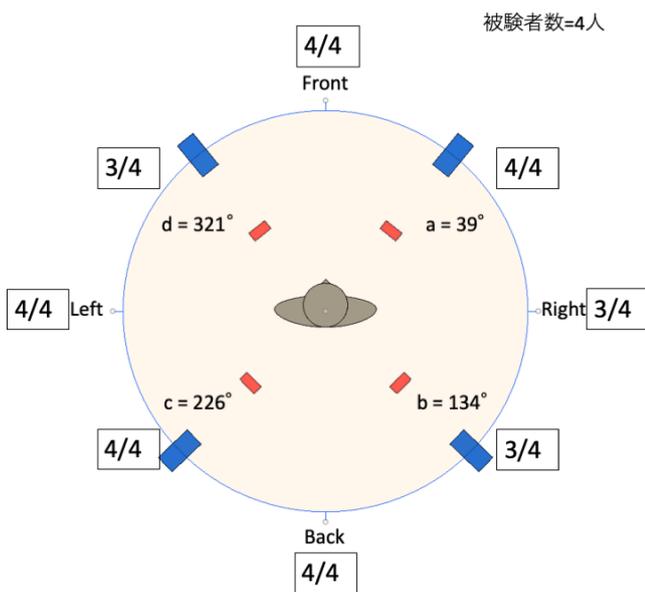


図 9 熱と風刺激を用いて全周から熱刺激の知覚を試みた実験の結果

の知覚を試みた実験において、一番最後に実験を行う方向である事から、被験者の身体表面の熱刺激に対する知覚が曖昧になった為であると推測する。これは、Kyungho Jeong[6]らが皮膚に対して熱刺激による情報提示を試みた際に、暖かい刺激を与えると刺激に対する知覚が曖昧になるという検証と同様の結果である。

7. 終わりに

本項では、VRを体験する被験者へマルチモーダルな刺激を提示する際に、被験者の身体に身に付ける事で刺激を提示するデバイスは装置自体の重量や圧迫感でVRの体験

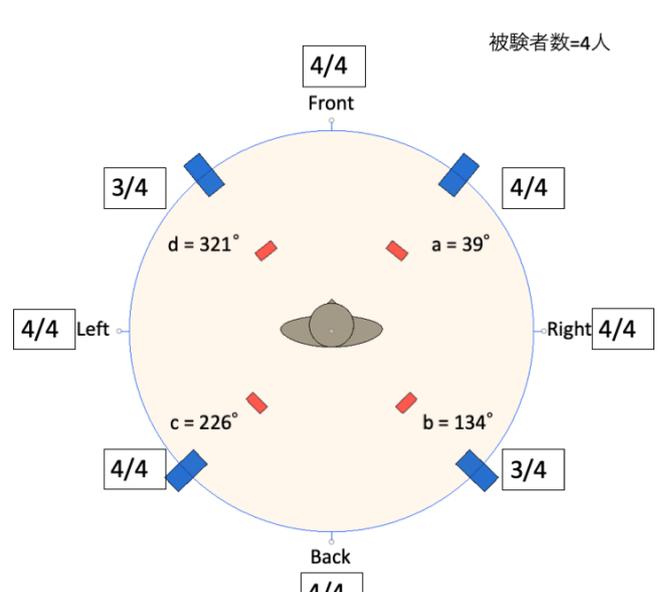


図 11 熱と風刺激を用いて全周から暖風と知覚可能であるかの実験結果

を損なっていると考えた。そこで、HMD以外のデバイスを装着せずに、非接触での熱刺激を提示する為に必要な熱源の配置を検証した。その結果、被験者の斜め前方と斜め後方に配置した4台のカーボンヒーターによる遠赤外線の放射と、HMDには熱源が存在する画像を表示する事で、全周から熱刺激の提示が可能であると判明した。

また、熱刺激での実験と同様の角度に配置したカーボンヒーターとファンによって、熱と風を提示する事で、被験者に暖風を錯覚させる事が可能であるか実験を行った。その結果、被験者に熱と風の刺激を同時に提示する事で、被

験者は二つの刺激によって全周から暖風と錯覚可能であると判明した。

参考文献

- [1] 伊藤亘輝, 小野龍一, 羽田久一: VR空間で全周囲から風を感じる為の送風機の配置の検討, 情報処理学会研究報告デジタルコンテンツクリエイション (DCC), Vol. 21, No. 48, pp. 1-5 (2019).
- [2] 小野龍一, 伊藤亘輝, 羽田久一: 首への熱刺激によるVR体験者への方向提示の提案, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2018論文集, Vol. 2018, pp. 220-223 (2018).
- [3] Ranasinghe, N., Jain, P., Karwita, S., Tolley, D. and Do, E. Y.-L.: Ambiotherm: Enhancing Sense of Presence in Virtual Reality by Simulating Real-World Environmental Conditions, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, ACM, pp. 1731-1742 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025723 (2017).
- [4] Shaw, E., Roper, T., Nilsson, T., Lawson, G., Cobb, S. V. and Miller, D.: The Heat is On: Exploring User Behaviour in a Multisensory Virtual Environment for Fire Evacuation, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, ACM, pp. 626:1-626:13 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300856 (2019).
- [5] Peiris, R. L., Peng, W., Chen, Z., Chan, L. and Minamizawa, K.: ThermoVR: Exploring Integrated Thermal Haptic Feedback with Head Mounted Displays, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, ACM, pp. 5452-5456 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025824 (2017).
- [6] Jeong, K., Seong, Y., Chung, J., Park, Y. and Lee, W.: Directional Thermal Perception for Wearable Device, *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*, SAP '15, ACM, pp. 133-133 (online), DOI: 10.1145/2804408.2814184 (2015).
- [7] Rietzler, M., Plaumann, K., Kränzle, T., Erath, M., Stahl, A. and Rukzio, E.: VaiR: Simulating 3D Airflows in Virtual Reality, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 5669-5677 (online), DOI: 10.1145/3025453.3026009 (2017).
- [8] Lee, J.: Wind Tactor: An Airflow-based Wearable Tactile Display, *Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 91-94 (online), DOI: 10.1145/3131785.3131838 (2017).
- [9] Cardin, S., Thalmann, D. and Vexo, F.: Head Mounted Wind, *proceeding of the 20th annual conference on Computer Animation and Social Agents (CASA2007)*, pp. 101-108 (online), available from (<http://infoscience.epfl.ch/record/104359>) (2007).