



# 冷気流群による一体感のある冷空間 VR システムの開発

牧野皓陽<sup>1)</sup>, 許佳禕<sup>1)</sup>, 家永直人<sup>2)</sup>, 金子暁子<sup>2)</sup>, 黒田嘉宏<sup>2)</sup>

Koyo MAKINO, Jiayi XU, Naoto IENAGA, Akiko KANEKO, and Yoshihiro KURODA

1) 筑波大学 理工情報生命学術院 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, makino@lelab.jp)

2) 筑波大学 システム情報系 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

**概要:** VR において視覚に合わせた温度感覚提示を非接触で行えれば、接触による違和感なく温度感覚を知覚できるためユーザの VR 空間への没入感向上が期待される。本研究では、滝に腕を入れたような冷空間再現を目指し、冷気流群による冷空間 VR システムの開発を目的とする。一体感のある冷覚提示のため、測定システムを用いて冷覚弁別限界の距離である二点弁別閾を調査し、それに基づき構築した冷空間 VR システムについて報告する。

**キーワード:** 冷覚, 一体感, 非接触, 噴流工学

## 1. はじめに

近年、バーチャルリアリティ(Virtual Reality: VR)への関心が高まり、視覚提示や触覚提示に加えて、温度感覚提示の研究が盛んに行われている [1]。温度感覚は、寒い・暑いといった環境からある物体に触れた際の物体の特性まで表現できるため、視覚提示に加えて温度感覚をユーザに提示することで臨場感が向上し、より VR 空間へ没入可能になると期待される。温度感覚の中でも温覚については LED を用いた提示手法が確立されており、冷覚に関しても、様々な手法が開発され、提示手法が確立されている。しかし、冷覚提示において VR 空間に没入するという観点では、改善の余地があると考えられる。本研究では、VR 体験において没入感を向上させる新たな冷覚提示手法の確立を目指す。

例えば、人が氷や水といった冷たい物体に手を入れた時に物体と触れている部位が冷たいものに包まれた感覚を感じ、南極や雪山にいる際は、露出している皮膚のまわりが寒い空気に覆われているように感じる。このように人は冷たい・寒い体験をする際に、物体あるいは空気と触れている皮膚面一帯が別々ではなく 1 つのまとまった冷たさを感じるため、VR 体験に連動して皮膚面に一体感ある冷空間を提示する必要がある。

これまで、非接触で冷覚を提示する手法として収束超音波とミストの気化熱を用いた研究 [2] やボルテックスチューブから放出される冷気流を用いた研究 [3] などが行われてきた。これらの手法は非接触で冷覚提示することが可能だが、部分的な冷覚提示である。そのため、手のひらや指など小さな皮膚面に対しては従来の手法で一体感ある冷たさを提示可能である。しかし、冷たい環境や冷たい物体に腕や脚を入れたりといったより広い皮膚面が冷たい物体や空気と触れるような体験に対して必要な一体感のある冷空間再現は試みられていない。

また、多方向から風をユーザに提示することで環境再現

を行った研究として、HMD に多方向から風を噴出するデバイスを装着した研究 [4] やプロアファンをユーザの周りに球状に配置して風を放出する研究 [5] が行われている。これらの手法は吐出口を多方向に多数配置しており、風の強弱を利用することで風環境を再現しているが、一体感ある冷空間提示に関する研究は、未だに行われていない。さらに、温冷環境の再現のために、ファンから出る温・冷風を一方向から体全体にあてることで環境再現を行う研究 [6] がある。この手法は体全体に冷覚提示を行うことで冷たい環境の再現を試みているが、この手法は人の体まわりの空気環境そのものを変えることで冷たさを再現しているため、環境を再現するのに時間がかかってしまう。人の冷たさの感じ方に着目して冷覚提示することで素早く一体感ある冷覚提示が出来ることが考えられる。

そこで、ノズルを冷覚の弁別限界の距離である二点弁別閾以内のノズル間距離で配置することで一体感ある冷空間の提示が可能だと仮定し、冷気流群による一体感ある冷空間 VR システムの開発を行う。具体的には、図 1 のように滝に手を入れた時の腕まわり一帯に感じる冷覚の表現を例として、二点弁別閾以内で冷気流の吐出ノズルを配置し、腕に冷覚提示することで最適なノズル個数で一体感ある冷空間を表現する。

本研究では、一体感のある冷覚提示のため測定システムを用いて冷覚弁別限界の距離である二点弁別閾を調査し、それに基づいて構築した冷空間 VR システムについて報告する。

## 2. 冷覚二点弁別閾測定システム

### 2.1 システムの構成

測定システムの全体図および提示部を図 2 に示す。本システムは冷気流を生成するボルテックスチューブ (Tohin 製 AC-50) に冷気流を二つに分流する二点型非接触冷覚提示部を結合させている。二点型非接触冷覚提示部は 3D プリン

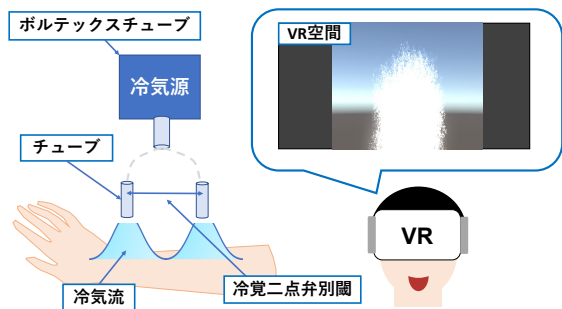


図 1: 冷空間 VR システムの概要図

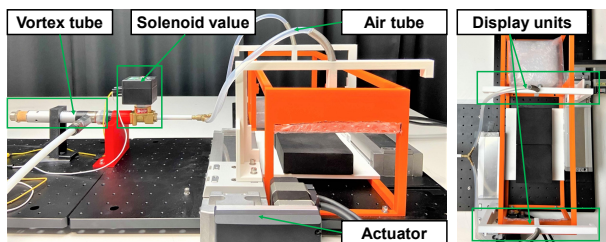


図 2: 測定システムの全体図

タ (Raise3D 製 Pro2 with PLA filament) で製作し、冷気流を放出するノズルの位置を制御するリニアアクチュエータ (Oriental motor 製 AZM46AC)、冷気流を供給するエアチューブ、比例電磁弁 (Asco 製 Positive-flow-202) によって構成されている。二つのリニアアクチュエータと比例電磁弁はマイコン (Arduino 製 UNO) とシリアル通信を行って制御を行う。電磁弁を PWM 方式で制御することで各ノズルから放出される冷気流の流量調整を行う。なお、各ノズルの最大流量は 25 L/min である。

### 2.2 冷気流源

本研究では、圧縮空気を高速回転させることで冷風と温風に分けるボルテックス効果 [7] を用いたボルテックスチューブを冷気流源として使用し、非接触で冷刺激を提示する。図 3 に示すように、圧縮空気をボルテックスチューブに供給すると同時に超低温空気が放出される。

## 3. 実験

### 3.1 実験概要

本実験は、前章の測定システムを用いて冷気流の冷覚二点弁別閾を調査し、12 人の実験参加者 (21~30 歳、平均

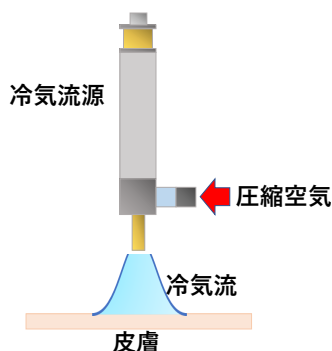


図 3: 冷気流源

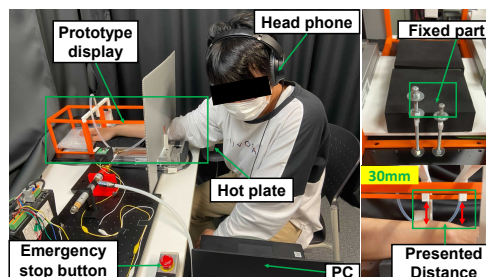


図 4: 実験環境

23.5 ± 2.53 歳, 男性 11 人, 女性 1 人) が実験に参加した。実験参加者は本システムの開発に関与していない。実験への参加に対して、1,000 円の Amazon ギフトカードが支払われた。実験参加者の募集と実験内容は、筑波大学 システム情報系研究倫理委員会 (2021R528) によって承認された。実験参加者は、書面によるインフォームドコンセントに参加することに同意している。提示部からは 5 段階の流量 5, 10, 15, 20, 25 L/min の冷気流が吐出され、アクチュエータは 10 段階の噴口間距離 50, 70, 90, 110, 130, 150, 170, 190, 210, 230 mm を移動できるように制御した。この条件のもと、実験参加者の上腕外側に冷気流を提示した際の冷覚二点弁別閾を極限法を用いて測定した。なお、PC 上に冷覚提示にあった映像ありなしの二つのパターンで実験を行った。

### 3.2 測定方法

図 4 のように、提示部の冷気吐出口から距離 30 mm の位置に上腕を固定できるように、固定部とクッションを設置した。実験参加者は中指を固定部に入れることで腕の位置が固定され、冷気吐出口と上腕の距離を一定にした。また、実験中はしきり板を実験参加者と測定システムの間を設置し、ノイズキャンセリングヘッドフォンを装着させてホワイトノイズを流すことで視覚、聴覚による感覚への影響を防いだ。

本実験の手順を図 5 に示す。まずは、33 °C に設定されたホットプレートに前腕内側を 30 秒置くことで皮膚温度を一定にする。次に測定システムに腕を置き、噴口間距離を段階的に広げながら二つの冷刺激を二点に感じるかどうかについてキーボードを用いて「はい」か「いいえ」で回答していく。一回の冷覚提示時間は 3 秒である。上昇系列終了後は再度ホットプレートに前腕内側を 30 秒置き、皮膚温度を一定にする。最後に測定システムに腕を置き、噴口間距離を段階的に狭めながら二つの冷刺激を二点に感じるかどうかについて「はい」か「いいえ」で回答していく。ここまでの流れを 1 セットとして、各流量で 3 セットずつ実験を行い、合計で 15 試行行う。

### 3.3 極限法

冷覚二点弁別閾の測定方法として、心理物理測定法の一つである極限法が存在する [8]。この手法は、二つの冷覚を別々に感じない状態から提示を開始し、二つの冷気吐出口間の距離である噴口間距離を段階的に広げていき、冷覚を別々

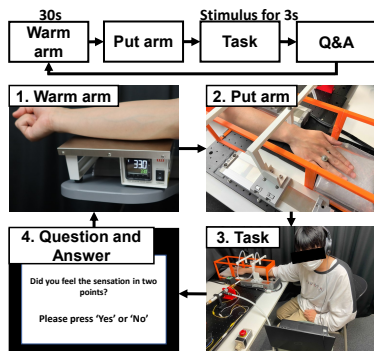


図 5: 実験手順

に感じたところで停止する。これを上昇系列と呼ぶ。一方で、冷覚を別々に感じている状態から噴口間距離を段階的に狭めていき、別々に感じなくなったところで停止する。これを下降系列と呼ぶ。この上昇系列と下降系列を繰り返すことで測定を行い、冷覚二点弁別閾は式 (1) から導かれる。

$$\text{二点弁別閾} = \frac{1}{2} \{ (\text{上昇系列で感覚が出現した距離}) + (\text{下降系列で感覚が消失した距離}) \} \quad (1)$$

### 3.4 実験結果

まずは、冷気流の冷覚二点弁別閾を測定した結果を図 6 に示す。流量が 15 L/min の時、冷覚二点弁別閾は 132.5 mm で最大の値をとり、流量が 25 L/min の時、冷覚二点弁別閾は 124.4 mm で最小の値となった。各流量における冷覚二点弁別閾の平均値は、 $129.1 \pm 2.943$  mm となった。

次に、視覚映像があった場合に冷気流の冷覚二点弁別閾を測定した結果を図 6 に示す。流量が 5 L/min の時、冷覚二点弁別閾は 142.2 mm で最大値をとり、流量が 25 L/min の時、冷覚二点弁別閾は 133.3 mm で最小値となった。各流量における冷覚二点弁別閾の平均値は、 $138.0 \pm 2.730$  mm となった。最後に、二元配置分散分析を行った結果、冷覚二点弁別閾は要因が流量 ( $p=0.11$ )、映像 ( $p=0.61$ )、相互作用 ( $p=0.84$ ) のいずれにおいても統計的な有意差はなかった。

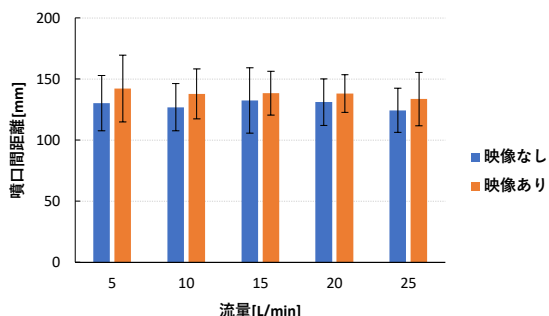


図 6: 映像の有無による冷覚二点弁別閾の比較図

### 4. 考察

今回の実験において、流量が変化することで人が感じる冷気流の冷覚二点弁別閾はほとんど変化しなかった。実験を行う前は、流量が多いほど冷気流が皮膚面に衝突した際

れ、冷覚二点弁別閾が大きくなると考えていたが、実験を行った結果、流量の増減によって冷覚二点弁別閾はあまり変化しないことがわかった。

また、映像による冷覚二点弁別閾への影響は見られなかった。実験を行う前は、刺激にあった映像を実験参加者に見せることで映像内に没入し、冷覚二点弁別閾が大きくなると考えていたが、実験を行った結果、映像の有無は冷覚二点弁別閾にあまり影響を与えないことがわかった。

### 5. 冷空間 VR システムの構築

実験結果から得られた流量と冷覚二点弁別閾の関係から、冷空間 VR システムを試作した。VR 空間上には図 7 のように 3 種類の小・中・大の滝が出現するようになっており、時間ごとに切り替わるようになっている。滝の大きさによって冷気流の流量を制御している。体験者はあらかじめ腕をデバイス内に設置し、腕が滝の中にあるような感覚を体験していただく。実際に体験者が VR 体験している様子および HMD 上に出現する滝の映像を図 7 に示す。Unity で VR 空間を作成し、冷空間提示の制御はリニアアクチュエータと比例電磁弁をマイコンとのシリアル通信によって行っている。

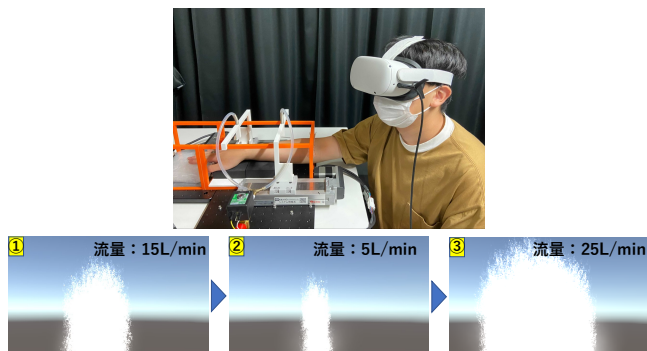


図 7: VR 体験の様子および滝の映像

### 6. 終わりに

本研究では、一体感のある冷覚提示のため測定システムを用いて冷覚弁別限界の距離である二点弁別閾を調査した。さらに、冷覚二点弁別閾が視覚映像によってどのような影響があるのか調査し、冷空間 VR システムの試作を行った。実験結果から、提案した測定システムを用いて冷気流の冷覚二点弁別閾を測定することが可能ということ、また流量が変化しても冷覚二点弁別閾の平均値は映像なしの場合  $129.1 \pm 2.943$  mm、映像ありの場合  $138.0 \pm 2.730$  mm となることが分かった。さらに、視覚映像がある場合でも冷覚二点弁別閾はほとんど変わらないことが分かった。今後は冷気流の提示距離を変えた時にどのような結果になるのか、物理的に冷覚二点弁別閾をどのように求めることができるのか調査を進めていきたい。

## 参考文献

- [1] P. Han, Y. Chean, K. Lee, H. Wang, C. Hsieh, J. Hsiao, C. Chou, Y. Hung: Haptic around: multiple tactile sensations for immersive environment and interaction in virtual reality, In Proceedings of the 24th ACM symposium on virtual reality software and technology, pp. 1–10, 2018.
- [2] M. Nakajima, K. Hasegawa, Y. Makino, H. Shinoda: Spatiotemporal Pinpoint Cooling Sensation Produced by Ultrasound-Driven Mist Vaporization on Skin, IEEE Transactions on Haptics, vol. 14, no. 4, pp. 874–884, 2021.
- [3] J. Xu, S. Yoshimoto, N. Ienaga, Y. Kuroda: Intensity-Adjustable Non-contact Cold Sensation Presentation Based on the Vortex Effect, IEEE Transactions on Haptics, 2022.
- [4] R. Michael, P. Katrin, K. Taras, E. Marcel, S. Alexander, R. Enrico: VaiR: Simulating 3D Airflows in Virtual Reality, In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 5669–5677, 2017.
- [5] 宮下 芳明, 小坂 崇之, 服部 進実: 没入型三次元風覚ディスプレイのためのコンテンツ開発 (「アート & エンタテインメント」特集), 日本バーチャルリアリティ学会大会論文誌, 12.3, pp. 315–321, 2007.
- [6] P. Han, C. Hsieh, Y. Chen, J. Hsiao, K. Lee, S. Ko, K. Chen, C. Chou, Y. Hung: AoEs: enhancing teleportation experience in immersive environment with mid-air haptics, In ACM SIGGRAPH Emerging Technologies, 3, 2017.
- [7] G.J. Ranque: Experiments on Expansion in Vortex with Simultaneous Exhaust of Hot and Cold Air, Le Journal De Physique et le Radium (Paris), Vol. 4, pp. 112–114, 1933.
- [8] G・A・ゲシャイダー: 心理物理学 方法・理論・応用, 北大路書房, pp. 44–52, 2011.
- [9] 社河内 敏彦: 噴流工学 基礎と応用, 森北出版, pp. 98–107, 2004.