



位置固定ノズルの回転による全周冷空間提示

星颯太郎¹⁾, 伊藤天翔²⁾, 金子暁子³⁾, 家永直人²⁾, 黒田嘉宏²⁾

Sotaro HOSHI, Takato ITO, Akiko KANEKO, Naoto IENAGA, and Yoshihiro KURODA

1) 筑波大学 理工学群 (〒 305-8577 茨城県つくば市天王台 1 丁目 1 - 1, hoshi@lelab.jp)

2) 筑波大学 理工情報生命学術院 (〒 305-8577 茨城県つくば市天王台 1 丁目 1 - 1)

3) 筑波大学 システム情報系 (〒 305-8577 茨城県つくば市天王台 1 丁目 1 - 1)

概要: 小型軽量の装置でユーザの周囲全体に冷空間を知覚させるために、首後方から冷気流を吐出し、コアンダ効果により首全周を冷やす手法が提案された。しかし、ノズルからの距離により冷却効率が異なるため、ノズル近傍と遠方では首表面の冷却に要する時間が異なる。本研究は、冷感覚の遅延を位置を固定したノズルの回転により解消する手法の開発を目的とする。首ファントムを用いた簡易実験により、温度低下の遅延時間を従来手法と比較した。本発表では、実験結果と試作した提案デバイスについて報告する。

キーワード: 冷覚, 遅延, 空間分布, コアンダ効果

1. はじめに

現在、人工現実感 (VR: Virtual Reality) 分野において、皮膚の温度変化によって寒冷状況を非接触かつ小型装置で体感させる冷空間の提示方法が研究されている。非接触の冷空間提示の中でも、首後方に 2 本のノズルから冷気流を吐出し、コアンダ効果により周囲全体が冷えていると感じさせる冷空間の提示手法が研究されている [1]。コアンダ効果とは、空気や水などの流体が、近くにある曲がった面に沿って流れ続ける現象のことである [2][3]。先行研究では、首を曲面として考え、冷気流をコアンダ効果により首全周に分布させている。

しかし、ノズルからの距離により冷却効率が異なるため、ノズル近傍と遠方では首表面の温度変化に要する時間が異なる。ノズルと皮膚表面までの距離の違いによる感覚の遅延は、常温の空間から冷空間に遷移する状況を表現する場合などに空間の没入感を低減させる可能性がある。それに対して、ノズルの位置を移動することで首前面を予冷することで遅延を解消する方法が考えられるが、首周囲にレーンルを配置するなど大掛かりな装置が必要になる。

本研究では、ノズルの回転により気流の向きを変化させ、ノズル遠方の皮膚表面を予冷し、その後ノズル近傍の皮膚表面を冷却する手法を提案する。本提案手法では、本来冷却が遅れる首前面を予冷することにより、従来手法と比較して首表面の温度が均等に下がっていくため、従来手法の課題である感覚の遅延を解消できると考えられる。しかし、ノズルの回転のみによって首表面の温度が均等に下がるかは明らかになっていない。

本稿では、本手法の実現可能性を確認するために、ノズルの回転により首全面の冷却の遅延を抑制できるか否かを調査する。具体的には、手動で回転させたノズルが、首表

面の温度分布の時間変化を計測し、首ファントムを用いて従来手法と比較することによって遅延を評価する。

2. 関連研究

Han らは、ユーザーの頭上に取り付けられた操縦可能な触覚デバイスを開発し、風の感覚を提供する「風モジュール」を VR に組み込んだ [4]。ユーザー調査では、このユビキタス型触覚を利用した風フィードバックが、VR 空間内でのユーザーの移動時に、より没入感のある体験を提供できることが示されている。ただし、この風向の変化はユーザーに風を追従させることを目的としており、今回問題としている感覚の遅延を解消するものではない。

Michael らは、多方向から風を噴出し、臨場感向上を目標としたデバイスの研究を行った [5]。このデバイスは、VR 体験における臨場感を高めることを目的とした、空気圧式のヘッドマウント型プロトタイプである。このデバイスは、ユーザーの頭の周りの 3D 空間で風源をアニメーション化すること、0.2 s 未満の遅延で短期間および長期間の気流を放出することが可能である。しかし、このデバイスにはノズルの数が多く、小型軽量な設備とは言えない。

牧野らは非接触の冷気流を用いた空間的に連続した冷覚提示の手法の提案と、その理論モデル・実験検証を行った [6]。最終的に、空間的に連続した冷覚提示が、少量の冷気流で実現可能であることを示した。しかし、この研究では刺激対象とする皮膚を平面としている。なお、空間的に連続した冷覚提示を少量の冷気流で曲面に対し実現可能であることは、先行研究 [1] で明らかになっている。

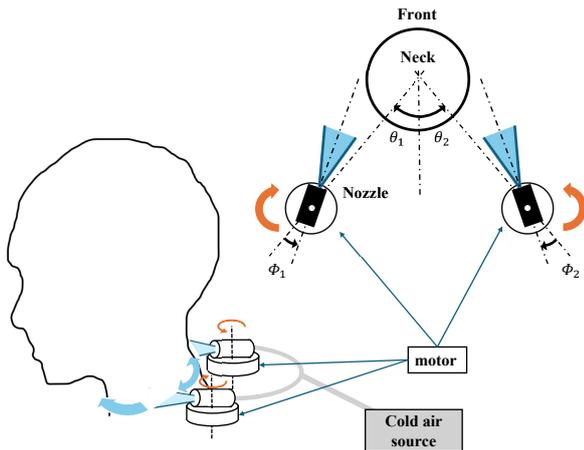


図 1: デバイス模式図と角度設定

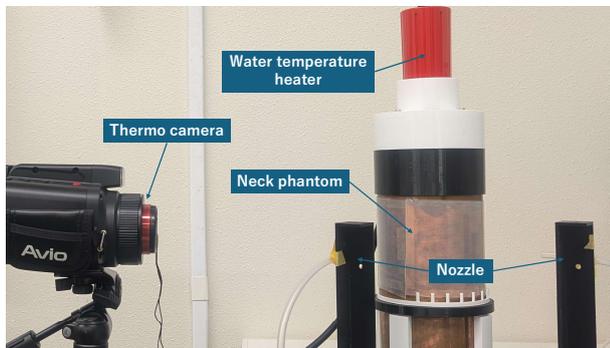


図 2: 首ファントムを用いた温度計測図

3. 提案手法

本稿では、従来手法の課題である冷空間における感覚の遅延を、位置を固定したノズルの回転により解消する手法を提案する。小型軽量化のために、それぞれのノズルに対して一つのモーターで制御する設計とし、ノズルの位置を変化させず、その場で回転する方式を採用する。本提案手法の模式図を図 1 に示す。図 1 における θ は首中心とノズル回転中心を結んだ線と、首の中心線が作る角度であり、 ϕ は首中心とノズル回転中心を結んだ線と、ノズルの向いている方向が作る角度である。 θ_1 と θ_2 の正方向は時計回りであり、 θ_2 と ϕ_1 の正方向は反時計回りである。今回の報告では図 1 における θ を 45° に固定し、 ϕ を変化させることを考える。この 45° という角度は、先行研究 [1] において、首全周を冷却可能な最小の θ である。また、今回の報告では θ_1 と θ_2 、 ϕ_1 と ϕ_2 は一致しており、首の中心線を対象の軸として線対称となっている。

4. 温度変化計測

首ファントムを用いて、図 1 におけるノズルの回転角 ϕ を変化させ、ノズル近傍と遠方において温度変化の遅延を低減することができるかを検証する。

4.1 計測環境

図 2 に実験環境と使用した首ファントムを示す。首ファン

トムは銅板(厚さ 2 mm)を直径 120 mm の筒状に加工し、中に水を満たしたものである。その水を水温ヒータ(SUNART 製 IC control heater SCH-900)で温めることで、筒側面に張り付けたシリコンシート(厚さ 1 mm)表面を人肌程度の温度(34°C 程度)とする。シリコンシート表面での温度変化をサーモカメラで撮影することで温度分布の計測を行う。また、圧縮空気によって冷気流を生成するボルテックスチューブ(Tohin 製 AC-50)に各ノズルを結合させ、首ファントムに冷風を噴出する。使用する冷風は流速 1.5 m/s とし、実験室温度はエアコンディショナーによって 25°C にした。冷風を噴出するノズルはシリコンシートと高さ合うように調整し、手で回転が可能になるようにしている。

4.2 実験手順

首ファントム表面のそれぞれの位置の温度変化を計測し、いずれかの位置において人間が冷覚を感じる温度変化(以降、閾値という)に達したときから、それぞれの位置において閾値に達するまでに要する時間を遅延時間と定義する。本実験では図 1 における θ_1 と θ_2 を 45° に固定し、首前面を予冷するために ϕ_1 と ϕ_2 を 45° から 0° に変化させる場合を回転条件、 ϕ_1 と ϕ_2 を 45° に固定した場合を固定条件として、それぞれの条件における温度変化を計測して、遅延時間を比較する。また、先行研究 [1][7] を参考に、閾値を 0.3°C とし、首ファントム表面のシリコンシートに対しては、熱容量などの違いから 0.17°C を閾値とみなす。本稿では、首ファントムに対して実験を行っているため、以降閾値は 0.17°C である。ノズルの先端から首ファントム表面のシリコンシートまでの距離は、 ϕ_1 と ϕ_2 を 45° としたときに 50 mm になっている。また、回転条件におけるノズルの回転は手動で行っているため、毎回の回転速度が一定でなく、数回データを計測しそれらの平均値を計算することが適切ではない。そのため、3 回計測を行った後、最も温度変化の遅延を低減できたデータを採用している。この対照実験において、同じ角度変化をしているデータは 1 度しか計測しないという実験条件をそろえるために、固定条件では 1 回のみ計測を行っている。

また、首ファントム表面における温度が変化している位置をわかりやすくするために、図 3 のように噴流管中心、つまり首ファントムの後方を 0° とし、首ファントムの正面を 180° とし、噴流管中心からの距離を定義する。測定時のサーモカメラの様子は図 4 のようになっており、噴流管中心からの距離が 15° である点 a から 165° である点 k までを 15° 刻みで測定している。また、首ファントムの左右両端のデータの信頼度が低いため、噴流管中心からの距離が 15° 、 30° 、 165° 、つまり図 4 の a, j, k のデータは採用していない。そのため、図 4 の c から j の計測位置におけるデータを採用し、それらのデータから噴流管中心からの距離が 180° までの近似曲線を作成するという方法をとっている。近似曲線は 3 次関数となっている。

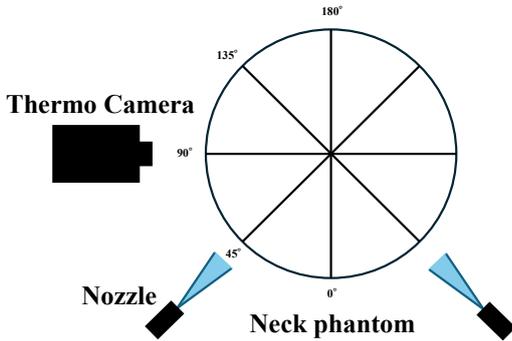


図 3: 首ファントム撮影時の噴流管中心からの距離の定義

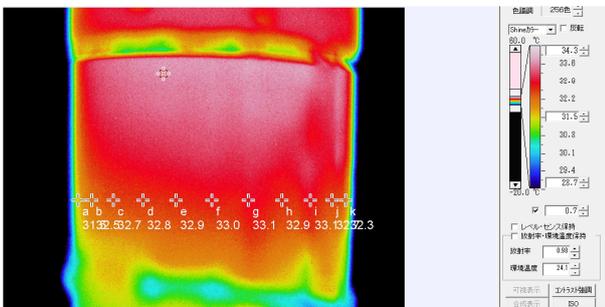


図 4: 撮影時の温度分布の様子と計測位置

4.3 実験結果

温度変化から算出された遅延時間の結果を図 5 に示す。Rotating nozzle は回転条件，Fixed nozzle は固定条件における遅延時間を表している。図 5 における横軸は噴流管中心からの距離であり，縦軸は遅延時間を示す。

結果として，噴流管中心からの距離が 180° のときには回転条件での遅延時間は 0.8 s，固定条件での遅延時間は 1.4 s

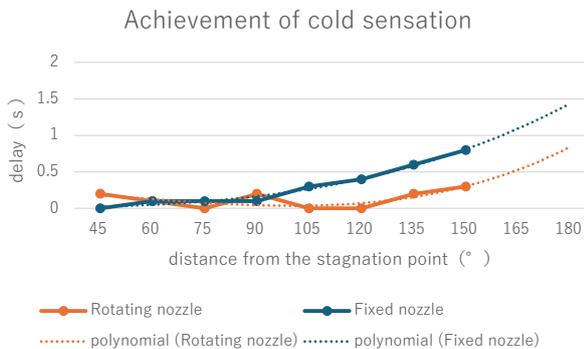


図 5: 首ファントムを用いた温度変化計測結果

であるため，0.6 s 程度温度変化の遅延が低減可能であることが明らかになった。また，ノズルを回転させない場合の温度変化は先行研究 [1] と一致している。

5. 考察

首ファントムを用いた実験により，ノズルの回転により温度変化の遅延の低減が可能であることが分かった。手動で回転させた場合でも 0.6 s ほど温度変化の遅延を低減することが可能であるので，より適切な回転制御を行うことによって，さらに温度変化の遅延を低減することが可能であることが考えられる。

しかし，本研究には課題が残されている。最も良い結果だけを採用することによる，妥当性や再現性の欠如である。本稿において実施した実験では，ノズルの回転を手動で行った。そのため，計測毎にノズルの回転速度が一定でなく，複数回の計測によって得られたデータから平均値をとったとしても，信頼性のあるデータを取得することができない。そのためには，数回の実験においてノズルの回転速度を変化させずに計測を行う必要がある。つまり，ノズルの回転を機械制御することによってデータを取得するといった方法が適切である。

そこで，ファントムに対して行う温度計測実験において使用するデバイスの提案をする。デバイスを設計するにあたって，以下の条件が必須である。

- ノズルの回転がモーターで機械制御可能であること
- ノズルの位置が変更可能であり，ノズルの高さはシリコンシートと同じであること
- 計測の邪魔にならないこと

以上のことに注目し，簡易実験後に実装したデバイスが図 6 である。ノズルの固定パーツの回転にはサーボモーター (Tower Pro Pte Ltd 製 SG90-HV) を使用している。ノズルの固定パーツとモーターの固定パーツについては 3D プリンター (Raise3D Pro2 with PLA filament) で製作した。

6. 終わりに

本稿では，従来手法と比較し，感覚の遅延が低減された冷覚の提示を可能とするデバイス製作に向けて，位置を固定したノズルの回転により，感覚の遅延を解消する方法を提案した。また，手法の実現可能性を確認する事前実験を実施し，その結果について報告した。具体的には，首ファントムに対して温度変化を測定し，従来手法と比較して温度変化の遅延を低減することが可能であることを確認した。また，ノズルの回転速度を制御するためのデバイスを新たに設計し，作成した。

今後は，作成したデバイスを使用し，より詳細なデータを取得するとともに温度変化の遅延を最小にできるノズルの回転速度を導出する。その後，知覚実験を実施し，心理的な結果を得た後，ノズルの回転や気流の流量など小型軽量のデバイスで変更可能な条件を調整し，より没入感のある冷空間提示のできるデバイスを製作する。



図 6: 提案するデバイス

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K02969, JP24K22316 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] K. Akimoto, J. Xu, A. Kaneko, N. Ienaga, and Y. Kuroda: 360-Degree Cold Sensation Presentation via Encircling Airflow Based on the Coandă Effect, IEEE WHC2025, pp.199-206, 2025.
- [2] C. Lubert: On Some Recent Applications of the Coandă Effect, International Journal of Acoustics and Vibration, vol.16, no.3, pp.144-153, 2011.
- [3] R. Wille and H. Fernholz: Report on the first European Mechanics Colloquium, on the Coanda effect, Great Britain, Journal of Fluid Mechanics, Volume 23, Issue 4, pp.801-819, 1965.
- [4] P. H. Han, Y. S. Chen, K. C. Lee, H. C. Wang, C. E. Hsieh, J. C. Hsiao, C. H. Chou, and Y. P. Hung: Haptic Around: Multiple Tactile Sensations for Immersive Environment and Interaction in Virtual Reality, ACM VRST 2018, 2018.
- [5] R. Michael, P. Katrin, K. Taras, E. Marcel, S. Alexander, and R. Enrico: Simulating 3D Airflows in Virtual Reality, CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.5669-5677, 2017.
- [6] K. Makino, J. Xu, A. Kaneko, N. Ienaga, and Y. Kuroda: Spatially Continuous Non-Contact Cold Sensation Presentation Based on Low-Temperature Airflows, IEEE WHC2023, pp. 223-229, 2023.
- [7] D. R. Kenshalo, E. H. Charles, and B. W. Paul: Warm and cool thresholds as a function of rate of stimulus temperature change, Perception and Psychophysics, vol. 3, no. 2, pp.81-84, 1968.