



コアンダ効果を利用した局所冷刺激による一体感提示

秋元快成¹⁾, 許佳禱²⁾, 金子暁子³⁾, 家永直人³⁾, 黒田嘉宏³⁾

Kaisei AKIMOTO, Jiayi XU, Akiko KANEKO, Naoto IENAGA, 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, akimoto@lelab.jp)

2) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4 丁目 6-1)

3) 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: 本研究では, 効率的に冷刺激を提示し, 没入感の高い体験を提供可能なデバイス開発を目標とする. 曲面に衝突した噴流が回り込むように進むことを利用し, 皮膚に対する局所刺激を一体とした刺激と知覚させることで, より一体感のある刺激の提示が可能と考える. 本発表では, 一体とした刺激と知覚する要因について温度変化率と圧力に着目し, 温度計測とシミュレーションを基に, これらがどのように一体感に寄与するか調査した結果を報告する.

キーワード: 冷覚, 流体シミュレーション, 噴流, コアンダ効果

1. はじめに

人工現実感 (Virtual Reality:VR) において, 没入感の高い体験をユーザに提供するためには, 視覚と連動した環境情報を提示する必要がある. 人間が実環境において温度変化を感じる時は, 体の一部だけでなく, 一体として温度変化を感じる場合が多い. 従って, 一体とした温度感覚の提示を効率的に行うことが重要となる. 効率的な一体感のある冷覚の提示に向け, 本研究では噴流を用いた冷刺激を使用する. 様々な刺激提示手段がある中で, 接触による不快感がなく, 非接触で刺激を提示可能な噴流は, 空間的に拡散し皮膚に対して連続的な刺激を与えるのに適している. また, 実際にユーザに適用するデバイス開発に向け, 人間の体の特性を考慮する必要がある. 人間の体は首や腕など, 丸みを帯びている部位が多い. よって曲面に対してどのように冷刺激を与えるかを考慮することで, より効率的に刺激を与えるデバイスの作成につながるかと考える.

ここで, 曲面に対して吹き付けられた噴流が, 壁面を沿うように進む“コアンダ効果”と呼ばれる性質があることに着目する. コアンダ効果とは, 噴流が自ら持っている粘性により, 周りの流体を引きこみながら進むため, 壁面に衝突した際, その面に沿うように進む効果のことである. 通常, 自由噴流は大気中の空気を巻き込みながら進むが, 近くに障害物がある場合, 空気の巻き込みの際に障害物との間に負圧が生じるため, 障害物を吸い寄せあるいは障害物に引き寄せられることで壁面に沿って進むといった現象が生じる [1][2]. この現象が皮膚表面でも生じると仮定すると, 皮膚に沿うように噴流が回り込むことで, 噴流中心だけでなく広範囲に一体感のある温度変化をもたらすと予想される. そのため, より少ない刺激で広い範囲に一体感のある温度感覚の提示にコアンダ効果が活用できる考える.

そこで, 効率的に刺激を与えることで一体感のある刺激

を提示し, 没入感の高い体験を提供できるデバイス開発を行うため, 噴流のコアンダ効果により皮膚表面に与える物理変化と知覚の関係を調査する必要がある. 本稿では, 一体感のある刺激と人間が知覚する要因について, 温度変化率と圧力に着目し, 温度計測とシミュレーションを基に, それぞれの物理変化量について計測した結果について報告する.

2. 関連研究

従来の気流を用いた VR 環境への没入感向上に向けた研究として, プロアファンをユーザの回りに円状に配置して風を噴出させることにより風環境を再現する研究 [3], HMD (Head Mounted Display) に向けて多方向から風を噴出し, VR の臨場感の向上を目的としたデバイスの研究 [4], ユーザの頭上にファン, ブLOWER, ミスト機, ヒートライトを使用し, 感覚提示を行うデバイス [5] 研究等がある. これらはユーザの周りの空気環境自体を変えることにより温度提示を行っているため, 即時提示性能にかける. また, プロアファンやノズルを多く使用していることで, デバイスとして大規模になっているという問題点がある. そこで, 人間の冷覚感の感じ方に着目し, 一体感のある冷覚をより最小要素で提示するための研究がある [6]. この研究は, 冷刺激を点としてではなく, 連続的な刺激としてユーザに知覚させるために, 2つの噴流による冷刺激間の距離を変更しながら実験し, 一体感のある知覚する距離を求めた研究である. この研究では, 皮膚表面を平面と捉えて冷刺激を与えているため, 垂直方向の冷却効果を確認するものであった. より効率的に一体感のある刺激を提示するため, 首や腕, 足など, 人間の身体における“丸み”を利用することで, より少ない要素で没入感を高められると考える. そこで本研究では, 温度変化率と圧力が一体感に寄与すると仮定し, 曲

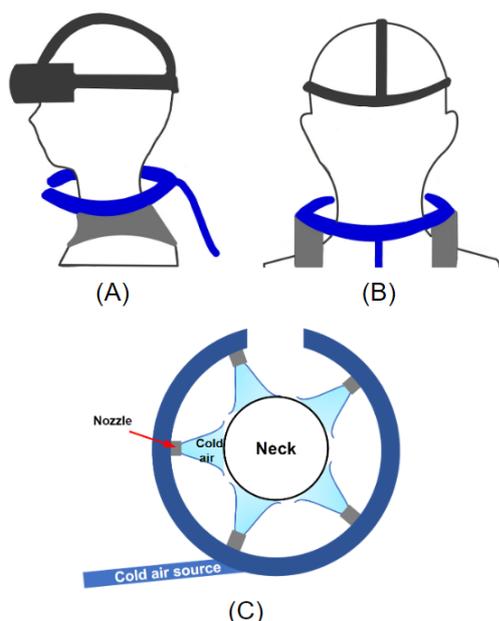


図 1: (A): デバイス使用図 (側面), (B): 後方, (C): 提案する冷覚提示デバイス

面上での噴流の挙動と、それによってもたらされる物理的変化を調査する。

3. 提案手法

効率よく冷刺激を提示し、没入感の高い体験をユーザに提供可能なデバイス開発に向け、一体感知覚変数を温度変化率と圧力を独立変数とする従属変数としてモデル化する。このモデル式に基づき、理想的なノズル配置のデバイスを作成する。デバイスイメージを図 1 刺激提示部位としては、比較的露出が多く全周を冷やししやすい首を対象とする。その後、開発したデバイスによる VR 環境への没入感の向上を調査する。

4. 温度変化計測

コアンダ効果によって一体感を知覚させる要因として、大きく対流伝熱と圧触覚による影響の 2 つが考えられる。そこで、まずはじめに対流伝熱による物変化について調査する。効率的に実験を実施するため、計測対象は人間の首ではなく、首のファントムを用いて温度変化の実験を行う。

4.1 計測環境

実験環境と、作成した首ファントムを図 2 に示す。図 2 中 (A) は側面から見た図、(B) は上から見た図である。銅板 (厚さ 2 mm) を直径 120 mm の筒状に加工し、中に水を満たす。その水を水温ヒータ (SUNART 製 IC control heater SCH-900) で温めることで、筒側面に貼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 (33~35 °C) とする。これを首のファントムとして使用し、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。首ファントムの周りにはレール部分とサーボモータとノズルをつなげた可動部からなる実験用デバイスを設置する。実験デバイ

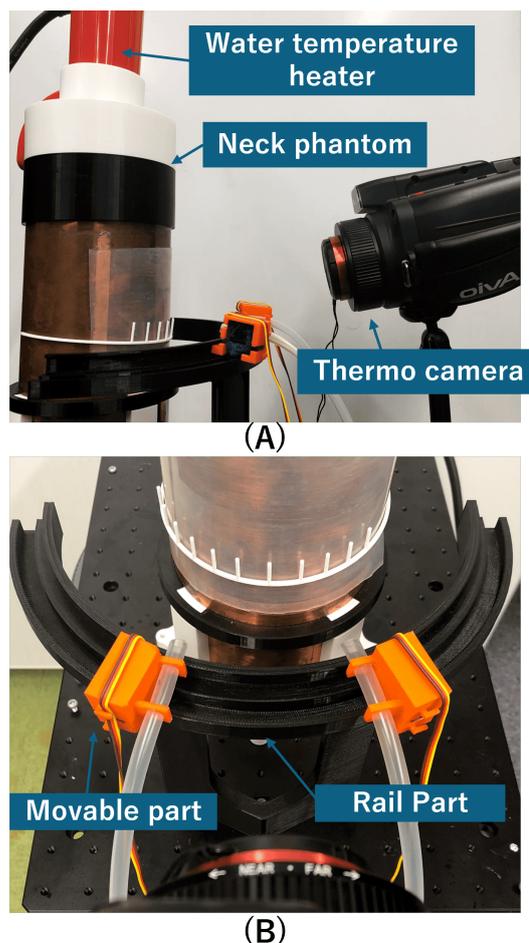


図 2: 首ファントムを用いた温度変化計測 (A) 側面図、(B) 上から見た図

スは 2 本のノズルをそれぞれサーボモータで移動させ、ノズル間距離を変更する。ノズルとサーボモータ (Tower Pro Pte Ltd 製 sg90-hv) をつなぐ部分とレールは 3D プリンタ (Raise3D Pro2 with PLA filament) で製作した。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。使用する冷風は流量 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。

4.2 実験手順

本実験ではノズル間角度を 5° から 155° まで 25° 間隔で調節し各角度における温度変化を調査する。ここでのノズル間角度は、首ファントムの中心を原点としたときの 2 つのノズルの開きを指し、ノズル間角度 0° とは 2 つのノズルが重なった状態である。各角度における温度計測は 5 回ずつ実施する。

4.3 実験結果

温度変化を 2 噴流間中心からの距離でグラフ化したものを図 3 に示す。結果として噴流中心のよどみ点では最大で 5.8 °C の温度変化をしていて、この中心から遠ざかるように温度変化が小さくなっていくことが確認された。また、図 3(f) より、噴流中心は首表面の中心 (3(f) 中の 0 の地点) から

7.5 cm 離れた点であるが、対流伝熱により、皮膚表面中心では最低 0.3 °C の皮膚表面の温度が変化していることが分かった。

5. 冷噴流シミュレーション

温度計測実験では一体感を知覚させる要因の一つとして考えられる対流伝熱による温度変化を計測した。そこでもう一方の要因として考えられる圧触覚について調査するため、シミュレーションソフト (COMSOL Multiphysics) を用いて、温度計測実験で使用した条件において、噴流が皮膚表面に対して与える影響を調査した。今回行ったシミュレーションは、使用した冷気流がレイノルズ数 2300 以下であったため比較的滑らかに流れる層流として扱う。レイノルズ数とは流体の慣性力と粘性力の比であり、流れの状態を分類するために使われる無次元数である。また、今回扱う流体は 1.5 m/s であり、流速 100 m/s 未満の噴流であるため、流れの速度や圧力の変化によって密度がほとんど変わらない非圧縮性流体の運動として計算した。非圧縮性流体を扱うため、運動を支配する方程式はナビエ-ストークス方程式 (1) と連続の式 (3) である。各変数として、 ρ は流体の密度、 v は流速、 p は圧力、 \mathbf{K} (2) は応力テンソルであり材料内部に作用する力を表す。 μ は動粘度係数、 F は外力である。シミュレーション上で扱う首は直径 120 mm の円とし、境界条件として壁面をすべりありとする。各変数は温度計測実験時に用いたものと同様とする。

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\mathbf{K} = \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (2)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

5.1 シミュレーション結果

シミュレーション図 4 中 (a) (c) では離れた 2 地点からの噴流が皮膚表面で合成された結果、一つのだよみ点 (流れの中で速度が 0 となる点) となることが確認された。またのだよみ点として、0.8 Pa を超える圧力を生じさせる面積が、ノズル間角度を図 4 中 (a) の 5 deg から図 4 中 (c) の 55 deg に広げるにつれて大きくなるのがわかる。一方で図 4 中 (d) 以降では、のだよみ点として 0.8 Pa を超える圧力の分布が 2 点に別れるようになったが、図 4 中 (d) 80 deg 以降は噴流の合成の結果、2 つのだよみ点中心にもう 1 つ別のだよみ点とみられる箇所が生じることが分かった。この中心に生じるのだよみ点とみられる点は図 4 中 (d) 80 deg の場合から順に 0.5 Pa、図 4 中 (e) の 0.4 Pa、図 4 中 (f) 0.2 Pa 程であり、この 2 つの噴流の合成によって、2 つのだよみ点中心に生じる、もう一点のだよみ点とみられる点で生じる圧力がある値、以上の時人間は一体感のある刺激として知覚すると考える。

6. 考察

今回の 2 つの実験において、対流伝熱に着目した温度変化実験では、図 3 中 (f) より、噴流中心が最大 5.8 °C 冷えているのに対し、噴流中心から 7 cm 以上離れた点であっても最低 0.3 °C の温度低下がみられることが分かった。結果より、コアンダ効果により、噴流から離れた点でも温度変化が生じるため、一体感をユーザに知覚させるためには、噴流中心から最も離れた点で、最低でもある値以上の温度変化をさせるように噴流を当てる必要があると考えられる。一方で圧触覚に着目した噴流シミュレーションでは、図 4 中 (c) よりノズル間角度が 55 deg 以下のときは、2 つの噴流が合成されて 1 つのだよみ点となり、広い範囲に 0.8 Pa を超える圧力を与えることが分かった。また、図 4 中 (d) の 80 deg を超えると、各噴流に対して 1 つのだよみ点が別々に生じるようになるが、圧力が一番小さくなると予想される、2 つの噴流中心の間の点に、もう一点のだよみ点と見られる点が現れることが分かった。このもう一点のだよみ点では、図 4(d) より 80 deg では 0.5 Pa、図 4(e) より 105 deg では 0.4 Pa、図 4(f) より 130 deg では 0.2 Pa の圧力である。2 噴流間で噴流の合成によって生じるもう一つのだよみ点と見られる点での圧力が一定の値以上の場合、圧力が最もかかる点とかけられない点での差が小さくなるため、皮膚にかかる圧力の差が、全体として滑らかとなり、一体感のある知覚につながると考える。また、仮に首に正対するようにノズルを配置した場合、コアンダ効果による回り込みにより、噴流中心の他に 2 つのだよみ点らしきものが生じると考えられる、この点で生じる圧力と噴流中心で生じる圧力の差が滑らかになるように調節すると 2 つのノズルで首の全周に対して一体感のある冷覚の提示が可能になると考える。

7. 終わりに

本稿では、露出が多く全周を冷やししやすい首に対して、偏りなく一体として感じられる冷覚の提示を可能とするデバイス作成に向け、コアンダ効果が人間の近くに与える影響を調査するために実施したいくつかの実験について説明した。一体感を知覚させる要因として対流伝熱による温度変化と圧触覚の 2 つが考えられると仮定した上で、初めに首のファントムを作成し、離れた 2 地点からの冷噴流が皮膚表面にどれほどの冷却効果があるかを確認した。次に COMSOL を用いたシミュレーションにより、噴流により皮膚表面で生じる圧力を調査した。今後は、知覚実験を実施し、心理的な結果を得る。その後、心理的变化と物理的变化の関係性をもとに適切なノズル配置を計算し、よりユーザに一体感のある刺激を提示可能である、冷環境没入感覚提示デバイスを作成する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21H03474, JP24K02969, JP24K22316 の助成を受けたものです。

参考文献

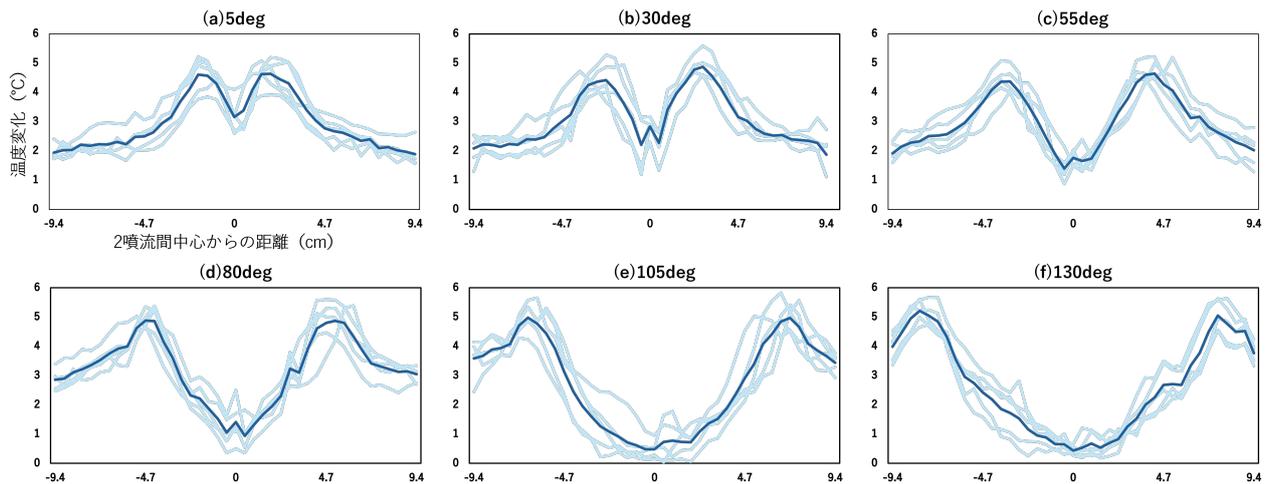


図 3: 首ファントムを用いた温度変化計測結果

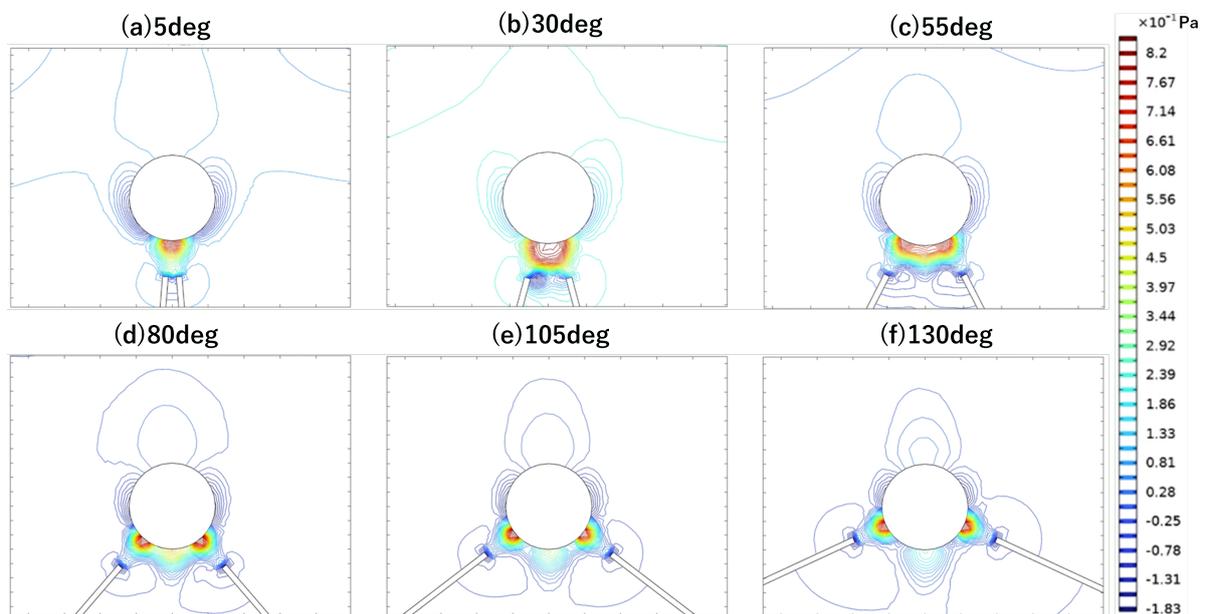


図 4: 圧力シミュレーション結果

[1] C. Lubert: On Some Recent Applications of the Coanda Effect, International Journal of Acoustics and Vibration, vol.16, N.3, pp. 144-153, 2011.

[2] R. Wille, 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.

[3] 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, 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.

[4] R. Michael, P. Katrin, K. Taras, E. Marcel, S. Alexander, R. Enrico: Simulating 3D Airflows in Virtual Reality, CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.5669-5677, 2017.

[5] 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, ACM symposium on virtual reality software and technology, pp.1-10, 2018.

[6] K. Makino, J. Xu, A. Kaneko, N. Ienaga, Y. Kuroda: Spatially Continuous Non-Contact Cold Sensation Presentation Based on Low-Temperature Airflows, IEEE World Haptics Conference 2023, pp. 223-229, 2023.